

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aleksandras CHLEBNIKOVAS

SMULKIADISPERSĖMS KIETOSIOMS
DALELĖMS IŠ AGRESYVIŲJŲ DUJŲ
ŠALINTI PATOBULINTO DAUGIAKANALIO
CIKLONO TYRIMAI IR KŪRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (T 004)



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2019

Disertacija rengta 2015–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Pranas BALTRĖNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Mindaugas RIMEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Nariai:

dr. Abhishek DUTTA (Leveno katalikiškasis universitetas, Belgija, aplinkos inžinerija – T 004),

dr. Dainius MARTUZEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004),

prof. habil. dr. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

prof. habil. dr. Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, aplinkos inžinerija – T 004).

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. spalio 4 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. rugsėjo 3 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-035-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-193-5

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Aleksandras Chlebnikovas, 2019

aleksandras.chlebnikovas@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aleksandras CHLEBNIKOVAS

RESEARCH AND DEVELOPMENT
OF THE MULTI-CHANNEL CYCLONE
FOR REMOVAL OF FINE-DISPERSED
PARTICULATE MATTER
FROM AGGRESSIVE GAS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (T 004)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2015–2019.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Pranas BALTRĖNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Environmental Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Mindaugas RIMEIKA (Vilniaus Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

Members:

Dr Abhishek DUTTA (KU Leuven, Belgium, Environmental Engineering – T 004),

Dr Dainius MARTUZEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Environmental Engineering – T 004),

Prof. Dr Habil. Vladas VEKTERIS (Vilniaus Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Prof. Dr Habil. Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS (Vilniaus Gediminas Technical University, Environmental Engineering – T 004).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Environmental Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 4 October 2019.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 3 September 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania)

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas patobulintas daugiakanalis ciklonas, kuris gali būti taikomas smulkiadisversėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų šalinti. Pagrindinis tyrimo objektas – patobulintas daugiakanalis naujos konstrukcijos su specialiai apdorotais paviršiais ciklonas. Pagrindinis disertacijos tikslas – pritaikius daugiakanalio ciklono konstrukcijos patobulinimus, atsižvelgiant į atliktų valymo proceso teorinių, eksperimentinių bei skaitinio modeliavimo rezultatus, sukurti dujų (oro) valymo įrenginį, gebantį pašalinti smulkiadisverses kietąsias daleles (1–10 μm) iš agresyviųjų dujų srauto. Darbe sprendžiami keli uždaviniai. Pirmasis skirtas teoriniams tyrimams, siekiant daugiakanaliame ciklone iširti fizikinius agresyviųjų dujų srauto parametrus. Antrasis bei trečiasis – skirti eksperimentiniams tyrimams, apimantiems agresyviųjų dujų srauto aerodinaminius parametrus, kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą, bei kietųjų dalelių prie ciklono vidinių paviršių adhezijos nustatymą. Ketvirtasis – skirtas skaitinio modeliavimo tyrimui atlikti, norint įvertinti agresyviųjų dujų srauto dvifazio srauto parametrus įtaką bei smulkiadisversių kietųjų dalelių šalinimo iš dujų efektyvumą. Penktasis – skirtas pramoninio bandomojo patobulinto daugiakanalio ciklono varianto, remiantis jo prototipu, kūrimui ir jo testavimui.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai. Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, pristatomas darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, nurodomas darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė ir ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra. Pirmajame skyriuje pateikta smulkiadisversių kietųjų dalelių sukeltos oro taršos apžvalga, daugiakanalių ciklonų taikymo dujoms valyti analizė ir agresyviųjų dujų srauto charakteristika.

Antrajame skyriuje pateiktos patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto dinaminių parametrų bei smulkiadisversių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo teorinių, eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų metodikos. Trečiajame skyriuje pateikti tyrimų rezultatai ir jų analizė, skirta patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto dinaminiais parametrams įvardyti bei smulkiadisversių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumui įvertinti.

Disertacijos tema paskelbta 17 straipsnių: septyni – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Clarivate Analytics Web of Science sąrašą, šeši – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, referuojamuose kitose duomenų bazėse ir keturi – konferencijų pranešimų leidiniuose. Gauti 1 Europos ir 2 Lietuvos Respublikos patentai. Disertacijos tema perskaityta 12 pranešimų konferencijose Lietuvoje ir kitose šalyse.

Abstract

The dissertation investigates the newly designed multi-channel cyclone for removal of fine-dispersed particulate matter from aggressive gas. The main object of research is the researches of a new design with specially treated surfaces upgraded multi-channel cyclone. The primary purpose of this dissertation is to create a gas (air) purifier capable of removal of fine-dispersed particulate matter (1–10 μm) from aggressive gas, developing design improvements of multi-channel cyclone, taking into account the results of performed theoretical and experimental research and numerical modelling of the purification process. The thesis approaches several tasks. Task 1 is related to the conduct of theoretical studies to investigate the physical parameters of aggressive gas flow in a multi-channel cyclone. Task 2 and Task 3 are conducted experimental studies of aerodynamic parameters of aggressive gas flow, the removal efficiency of particulate matter and evaluation of the adhesion of particulate matter on the cyclone's inner surfaces. Task 4 is performed numerical modelling studies, evaluating the influence of aggressive gas flow on two-phase flow parameters and removal efficiency of fine-dispersed particulate matter from gas. Task 5 is development and testing of pilot newly designed multi-channel cyclone based on its prototype.

The dissertation consists of three parts including an introduction, 3 chapters, conclusions and references. The introduction discusses the research problem, the relevance of the thesis, describes the object of the research, formulates the aim and objectives of the thesis, describes the research methodology, scientific novelty of the thesis, the practical value of the research findings, defended statements. At the end of the introduction, the publications and reports published by the author on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation are presented.

An overview of air pollution caused by fine-dispersed particulate matter, analysis of the application of multi-channel cyclones for cleaning of gas and a characteristic of aggressive gas flow is presented in the 1st chapter.

Chapter 2 presents the theoretical, experimental and modelling research methods of newly designed multi-channel cyclone, aggressive gas flow dynamic parameters and removal efficiency of fine-dispersed particulate matter. Chapter 3 investigates the the dynamic parameters of the aggressive gas flow in newly designed multi-channel cyclone and the removal efficiency of particulate matter.

17 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: seven articles – in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science list, six – in peer-reviewed scientific journals referenced in other databases and four – in conference proceedings. The 1 European patent and the 2 patents of the Republic of Lithuania have been granted. 12 presentations on the subject have been presented in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

B – ciklono geometrinis parametras (skersmuo, aukštis), m;

C – koncentracija, mg/m³ arba ppm;

d_d – kietosios dalelės skersmuo, m;

F – veikianti jėga, N;

G – turbulentinės kinetinės energijos pokytis, J;

k – turbulentinės kinetinės energijos (vidutinio fluideo greičio) fluktuacija, J;

μ – dinaminė klampa, Pa·s;

P – slėgis, mm Hg arba Pa;

Q – dujų srauto debitas, m³/s;

r_d – kietosios dalelės spindulys, m;

$t_{d.s.}$ – dujų srauto temperatūra, °C;

U – dujų srauto greitis, m/s;

V – kietosios dalelės greitis dujų sraute, m/s;

ε – kinetinės energijos išsklaidymo greitis (fluktuacijos mažėjimas dėl klamos), J/kg·s;

$\eta_1, \eta_{2,5}, \eta_{10}$ – atitinkamai 1 μm, 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas, %.

Θ – drėkinimo kampas, °;

ν – kinematinė klampa, m²/s;

ρ_0 – dujų srauto tankis normaliosiomis sąlygomis, kg/Nm³;

ρ_d – kietosios dalelės tankis, kg/m³;

$\sigma_{pav.}$ – paviršiaus įtempis, N/m;

ν_T – turbulentinė kinematinė klampa, m^2/s ;

$\varphi_{d.s.}$ – dujų srauto santykis drėgnis, %;

ω – kinetinės energijos disipacijos lyginamasis greitis, J/kg·s.

Santrumpos

KD_{10} – kietosios dalelės, kurių 50 % praeina pro joms pralaidžią $10\ \mu m$ aerodinaminio skersmens angą (angl. *particulate matter up to $10\ \mu m$* (PM₁₀));

$KD_{2.5}$ – kietosios dalelės, kurių 50 % praeina pro joms pralaidžią $2,5\ \mu m$ aerodinaminio skersmens angą (angl. *particulate matter up to $2.5\ \mu m$* (PM_{2.5}));

LOJ – lakieji organiniai junginiai;

SDKD – smulkiadisversės kietosios dalelės (angl. *fine-dispersed particulate matter* (FDPM));

SFD – skaičiuojamoji fluidų dinamika;

ppm – priemaišų (tirpinių) milijoninė masės dalis (angl. *parts per million*);

t. k. e. – turbulentinė kinetinė energija.

Apibrėžtys

Agresyviųjų dujų srautas – dujų srautas, kurio veiksniai, t. y. aukšta temperatūra ir didelis santykinis drėgnis (esant $50\ ^\circ C$ temperatūrai didžiausias pasiekiamas 95 % santykinis drėgnis, o $200\ ^\circ C$ – 6,6 %) bei jame esantys cheminiai junginiai (anglies monoksidas ir acetonas), daro neigiamą įtaką daugiakanalio ciklono veikimui ir valymo efektyvumui.

Filtravimas daugiakanaliame ciklone – kartu su veikiančia išcentrine jėga papildomai vykstantis daugkartinis kietųjų dalelių nusodinimas, kuris pasireiškia grįžtančio (periferinio) ir įtekančio į pirmą ciklono kanalą dujų srautų sandūroje. Tolimesniuose kanaluose filtravimas vyksta tarp grįžtančio (periferinio) ir iš ankstesnio kanalo įtekančio į sekantį kanalą (tranzitinio) dujų srautų. Filtravimo zonose vyksta kietųjų dalelių sulaikymas, nusodinimas bei nukreipimas į plyšius separavimo kameros dugne.

Patobulintas daugiakanalis ciklonas – keturkanalis (keturių išorinių kanalų ir tariamojo vidinio centrinio kanalo) ciklonas su antriniais dujų įtekėjimais, kanalų konfigūruotais ketvirtadalio žiedo formos elementais, išgaubtu dugnu bei ne tik išoriniu ištisiniu žiediniu, bet ir vidiniais kanalų segmentiniais žiediniais persidengiančiais plyšiais.

Smulkiadisversės kietosios dalelės – kietosios dalelės dujų sraute, susidaranti technologinių procesų metu, kurių skersmuo siekia 1–10 mikrometrų.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodikos	4
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų apibavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. SMULKIADISPERSĖMIS KIETOSIOMIS DALELĖMIS SUKELIAMA ORO TARŠA, DAUGIAKANALIŲ CIKLONŲ TAIKymo DUJŲ VALYmui ANALIZĖ IR AGRESYVIŲJŲ DUJŲ SRAUTO CHARAKTERISTIKA	7
1.1. Smulkiadispirsių kietųjų dalelių susidarymas, taršos šaltiniai aplinkoje bei užterštumo problemos	8
1.2. Smulkiadispirsių kietųjų dalelių savybės bei poveikis aplinkai ir žmogui	14
1.3. Smulkiadispirsių kietųjų dalelių šalinimo iš dujų srauto būdai ir jų pritaikymas daugiakanaliuose ciklonuose	19
1.3.1. Ciklonų konstrukcijos sukurtos JAV bei Vakarų Europos ir Azijos šalyse 21	

1.3.2. Daugiakanalių ciklonų konstrukcijos sukurtos Rytų Europos šalyse.....	29
1.4. Daugiakanaliuose ciklonuose vykstančių procesų teorinių tyrimų apžvalga.....	36
1.5. Agresyviųjų dujų srauto charakteristika ir jo įtaka ciklono veikimo parametrų	40
1.6. Dujų srauto procesų ciklonuose modeliavimas	46
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	50
2. PATOBULINTO DAUGIAKANALIO CIKLONO AGRESYVIŲJŲ DUJŲ SRAUTO DINAMINIŲ PARAMETRŲ BEI SMULKIADISPERSIJŲ KIETŲJŲ DALELIŲ ŠALINIMO EFEKTYVUMO TEORINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKOS.....	53
2.1. Patobulinto daugiakanalio ciklono teorinių tyrimų, įvertinant agresyviųjų dujų srauto fizikinius parametrus, metodika.....	55
2.2. Agresyviųjų dujų srauto sudarymo metodika	57
2.3. Paviršiaus glotnumo tyrimų metodika	60
2.4. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto greičio tyrimų metodika	63
2.5. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto slėgių tyrimų metodika	67
2.6. Patobulinto daugiakanalio ciklono bendro kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų metodika	69
2.7. Patobulinto daugiakanalio ciklono 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų metodika	73
2.8. Kietųjų dalelių ir dujų judėjimo procesų skaitinio modeliavimo metodika.....	77
2.9. Antrojo skyriaus išvados	82
3. PATOBULINTO DAUGIAKANALIO CIKLONO AGRESYVIŲJŲ DUJŲ SRAUTO DINAMINIŲ PARAMETRŲ BEI SMULKIADISPERSIJŲ KIETŲJŲ DALELIŲ ŠALINIMO EFEKTYVUMO TEORINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ.....	85
3.1. Patobulinto daugiakanalio ciklono teorinių tyrimų, įvertinant agresyviųjų dujų srauto fizikinius parametrus, rezultatai ir jų analizė	86
3.2. Agresyviųjų dujų srauto sudarymo tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	105
3.3. Paviršiaus glotnumo tyrimų rezultatai ir jų analizė	117
3.4. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto greičio tyrimų rezultatai ir jų analizė	119
3.5. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto slėgių tyrimų rezultatai ir jų analizė	124
3.6. Patobulinto daugiakanalio ciklono bendro kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	127
3.7. Patobulinto daugiakanalio ciklono 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė.....	132
3.8. Kietųjų dalelių ir dujų judėjimo procesų skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatai ir jų analizė	134
3.9. Inžineriniai sprendimai	150
3.10. Trečiojo skyriaus išvados	156
BENDROSIOS IŠVADOS	159

REKOMENDACIJA.....	163
LITERATŪROS SĄRAŠAS	165
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	177
SUMMARY IN ENGLISH.....	181
PRIEDAI ¹	197
A priedas. Statistinio duomenų apdorojimo metodika	199
B priedas. Cinkuotos skardos ir juodojo metalo paviršiaus glotnumo tyrimų rezultatų analizė.....	202
C priedas. Medienos ir medienos pelenų 2,5 µm ir 10 µm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatų analizė	206
D priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	211
E priedas. Bendraautoriių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	212
F priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	220

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
The research methods	4
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
Defended statments	4
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
1. AIR POLLUTION CAUSED BY FINE-DISPERSED PARTICULATE MATTER, APPLICATION ANALYSIS OF MULTI-CHANNEL CYCLONE FOR GAS CLEANING AND CHARACTERISTIC OF AGGRESSIVE GAS FLOW	7
1.1. Fine-dispersed particulate matter formation, pollution sources in the environment and pollution problems	8
1.2. Fine-dispersed particulate matter properties and impact on the environment and human	14
1.3. Fine-dispersed particulate matter removal techniques from gas flow and their application in multi-channel cyclones	19
1.3.1. Cyclones designed in the United States of America, Western Europe and Asia	21
1.3.2. Multi-channel cyclones designed in the Eastern Europe	29

1.4. Review of theoretical research of processes in multi-channel cyclones	36
1.5. Aggressive gas flow characteristic and its influence on cyclone operating parameters	40
1.6. Gas flow modelling processes in cyclones	46
1.7. First chapter conclusions and formulation of dissertation tasks	50
 2. THE METHODOLOGIES OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF AGGRESSIVE GAS FLOW DYNAMIC PARAMETERS AND REMOVAL EFFICIENCY OF FINE-DISPERSED PARTICULATE MATTER IN NEWLY DESIGNED MULTI-CHANNEL CYCLONE	53
2.1. Methodology of theoretical research into physical parameters of aggressive gas flow in newly designed multi-channel cyclone	55
2.2. Methodology of aggressive gas flow generation	57
2.3. Methodology of surface smoothness research	60
2.4. Methodology of aggressive gas flow velocity research in newly designed multi-channel cyclone	63
2.5. Methodology of aggressive gas flow pressure research in newly designed multi-channel cyclone	67
2.6. Methodology of overall removal efficiency of particulate matter research of newly designed multi-channel cyclone	69
2.7. Methodology of removal efficiency research of 2.5 μm and 10 μm of newly designed multi-channel cyclone	73
2.8. Methodology of numerical modelling of particulate matter dynamics and gas movement	77
2.9. Second chapter conclusions	82
 3. THE RESULTS AND ANALYSIS OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF AGGRESSIVE GAS FLOW DYNAMIC PARAMETERS AND REMOVAL EFFICIENCY OF FINE-DISPERSED PARTICULATE MATTER IN NEWLY DESIGNED MULTI-CHANNEL CYCLONE	85
3.1. The results of theoretical research on physical parameters of aggressive gas flow in newly designed multi-channel cyclone	86
3.2. The results of research on aggressive gas flow generation	105
3.3. The results of research on surface smoothness	117
3.4. The results of research on aggressive gas flow velocity in newly designed multi-channel cyclone	119
3.5. The results of research on aggressive gas flow pressure in newly designed multi-channel cyclone	124
3.6. The results of research on overall removal efficiency of particulate matter of newly designed multi-channel cyclone	127
3.7. The results of research on removal efficiency of 2.5 μm and 10 μm of newly designed multi-channel cyclone	132
3.8. The results of numerical modelling research on particulate matter dynamics and gas movement	134

3.9. Engineering solution	150
3.10. Third chapter conclusions	156
GENERAL CONCLUSIONS	159
RECOMMENDATION	163
REFERENCES	165
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	177
SUMMARY IN ENGLISH	181
ANNEXES ²	197
Annex A. Methodology of statistical data processing	199
Annex B. Analysis of surfaces smoothness of galvanized sheet and black metal	202
Annex C. Analysis of results of removal efficiency of 2.5 µm and 10 µm wood and wood ash particulate matter	206
Annex D. Declaration of academic integrity	211
Annex E. The co-authors' agreements to present publications material in the dissertation	212
Annex F. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation	220

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Lokalūs kietosiomis dalelėmis užteršti išmetamųjų gamybinių dujų iš taršos šaltinių (oro) srautai – viena iš labiausiai nerimą keliančių šiuolaikinių aplinkosaugos problemų.

Smulkiadispersių kietųjų dalelių (SDKD) emisijos siejamos su automobilių transporto, stambiųjų pramonės įmonių išmetamųjų teršalų, taip pat su privačių namų valdų šilumos gamybos įrangos poveikiu aplinkos oro kokybei. Didžioji dalis SDKD išsiskiria statybinių medžiagų, kalnakasybos, metalo ir medienos apdirbimo, metalurgijos ir maisto pramonės bei energijos gamybos objektuose – termofikacinėse ir šiluminėse elektrinėse, kietojo ir skystojo kuro katilinėse.

Mažesnės nei 5 μm skersmens SDKD yra labai kenksmingos žmonių sveikatai, nes jos lengvai patenka į plaučius bei kvėpavimo takus ir juose kaupiasi. Ilgalaikis poveikis, kvėpuojant dulketu oru, pasireiškia kvėpavimo takų pažeidimais, teršalai veikia ne tik plaučių audinį, bet ir visą žmogaus organizmą, todėl žmogus gali susirgti pneumokonioze ir kt. ligomis, sukelti akių ir odos pažeidimus (Guarnieri and Balmes, 2014).

Taršos šaltiniuose vykstant degimo, gaminių apdorojimo (džiovinimo, cheminių junginių įterpimo) procesams, susidaro ne tik dulkėtas, bet ir agresyviųjų

dujų srautas. Tokių procesų metu yra pakeičiamos išsiskiriančių SDKD fizikinės, cheminės ir mechaninės savybės.

SDKD šalinti iš oro (dujų) yra labai sudėtinga, nes tam reikia sudėtingų valymo įrenginių. Yra naudojama daug aukšto efektyvumo kietųjų dalelių šalinimo iš dujų (oro) įrenginių, iš kurių labiausiai paplitę elektrostatiniai bei rankoviniai filtrai. Šių filtrų eksploatavimas sudėtingas, todėl jų taikymo galimybės yra labai ribotos. Tokių įrenginių trūkumai ypač pasireiškia iš agresyviųjų dujų srauto atskiriant lipnias bei drėgnas SDKD.

Darbo aktualumas

Sauso dulkėto srauto valymui efektyviai naudojami tradiciniai ciklonai, tačiau jų veikimas paremtas kietųjų dalelių šalinimu tik dėl išcentrinų jėgų, todėl jie nepasižymi itin dideliu dujų valymo efektyvumu, o ypač tai akivaizdu tada, kai dujų srautas užterštas smulkiais (mažesnėmis nei 20 μm skersmens) kietosiomis dalelėmis.

Literatūros šaltiniuose aptinkama duomenų apie daugiakanalio ciklono įrenginių taikymą neagresyvioms dujoms valyti, sugaudant didesnes nei 1 μm skersmens SDKD. Jų veikimas pagrįstas tuo, kad dulkėtas srautas, pereidamas per ciklono kanalų sistemą, išvalomas nuo kietųjų dalelių ne tik veikiant išcentrinei jėgai, bet ir papildomai sulaikant dalį kietųjų dalelių, vykstant filtravimui.

Gausu atliktų mokslininkų grupių teorinių, eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų susijusių su daugiakanaliais ciklonais, o sukurtiems išradimams gauti patentai. Tačiau juose kreipiamas dėmesys tik į įrenginyje esamų kreivlininių pusžiedžių skaičių ir jų išdėstymą, išliekant nepakitusiai vidinei įrenginio geometrijai, taip pat retai vertinamas įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas dujų valymo metu. Tyrimai atlikti esant normalioms sąlygoms, t. y. nedideliame aplinkos drėgnumui ir temperatūrai, neįvertinus cheminių junginių įtakos valomų dujų sraute.

Lietuvos mokslininkai (Vekteris, Striška, Mokšin ir kt., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (VGTU)) eksperimentiškai tyrė kietųjų dalelių tarpusavio sąveiką bei adheziją ciklone veikiant akustiniam laukui, o Norvegijos mokslininkai (Christiansen, Sveberg, Hjelkrem & Kvamsdal, 2005, Naftos ir dujų pramonės separavimo technologijos NATCO Norway AS) suprojektavo bei patobulino cikloną, kuriame įrengtais konstrukciniais sprendimais buvo siekiama išvengti įrenginio aprasojimo.

Nors daugiakanaliai ciklonai yra labiau pritaikyti lipnioms kietosioms dalelėms iš dujų (oro) šalinti, tačiau, esant ypatingoms sąlygoms (aukštai temperatūrai, dideliame drėgnumui ir dujų sraute esant cheminių junginių) jie užsikemša, todėl valymo procesas nebevyksta. Jų regeneravimas yra sudėtingas ir

neilgalaikis, todėl eksploatavimas tokiomis sąlygomis reikalauja papildomo valymo įrenginio mokslinio įvertinimo.

Tyrimų objektas

Sukurtas patobulintas daugiakanalis naujos konstrukcijos ciklonas su pritaikytais pirminiu ir antriniais dujų įtekėjimais, konfigūruotais kreivalinijiniais elementais, išgaubtu separavimo kameros dugnu, ir jame esančiais išoriniu ir vidiniais plyšiais, ir specialiai apdorotais paviršiais, skirtas neabrazyvioms smulkia-dispersėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų šalinti.

Darbo tikslas

Pritaikius daugiakanalio ciklono konstrukcijos patobulinimus, atsižvelgiant į atliktų valymo proceso teorinių, eksperimentinių tyrimų bei skaitinio modeliavimo rezultatus, sukurti dujų (oro) valymo įrenginį, gebantį pašalinti smulkiadisverses kietąsias daleles ($1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$) iš agresyviųjų dujų srauto (kai temperatūra $50\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$, santykinis drėgnis – daugiau nei 95 %, dulkėtas srautas užterštas cheminiais teršalais).

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti keliama šie uždaviniai:

1. Teoriškai išanalizuoti agresyviųjų dujų srauto fizikinius parametrus patobulintame daugiakanaliame ciklone.
2. Eksperimentiškai ištirti agresyviųjų dujų srauto patobulintame daugiakanaliame ciklone aerodinaminius parametrus ir jų priklausomybes.
3. Eksperimentiškai ištirti bendrą kietųjų dalelių ir atskirų frakcijų ($KD_{2,5}$ ir KD_{10}) šalinimo patobulintame daugiakanaliame ciklone, esant agresyviųjų dujų srautui, efektyvumą, taip pat įvertinti kietųjų dalelių adheziją prie ciklono vidinių paviršių, atsižvelgiant į konstrukcinių elementų paviršiaus glotnumą.
4. Taikant skaitinį modeliavimą įvertinti agresyviųjų dvifazio srauto parametrus ir smulkiadisversių kietųjų dalelių judėjimo trajektorijas ir jų įtaką šalinimo efektyvumui.

5. Pagal patobulinto ciklono prototipą sukurti pramoninį bandomąjį daugiakanalį cikloną smulkiadisversėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų šalinti ir patikrinti kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą.

Tyrimų metodikos

Darbe taikomos agresyviųjų dujų srauto tyrimo ir $KD_{2,5}$ ir KD_{10} šalinimo metodikos: šaltinio sudarymo; teorinių tyrimų agresyviųjų dujų srauto veiksmų vertinimo; greičio ir tūrio debito ortakyje taškų parinkimo, slėgių tyrimo; kietųjų dalelių bendros koncentracijos nustatymo ir atskirų frakcijų ($KD_{2,5}$ ir KD_{10}) koncentracijų tyrimo panaudojant kaskadinį impaktorių, taikant svorio metodą. Patobulintame daugiakanaliame ciklone vienfazio ir dvifazio agresyviųjų dujų srauto modeliavimui naudojamas skaitinio modeliavimo „ANSYS“ įrankis.

Darbo mokslinis naujumas

Darbo naujumą sudaro atliktų agresyviųjų dujų srauto kompleksinių teorinių ir eksperimentinių patobulintame daugiakanaliame ciklone tyrimų rezultatai, taikant antrinius dujų įtekėjimus ir pritaikytus konstrukcinius sprendimus, vykstančių aerodinaminių ir adhezijos procesų modeliavimas bei pramoninio bandomojo daugiakanalio ciklono kūrimas smulkiadisversėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų srauto šalinti, užtikrinant aukštą valymo efektyvumą bei apsaugą nuo ciklono užsikimšimo.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimai suteiks galimybę nustatyti optimalius parametrus smulkiadisversėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų šalinti. Taikant konstrukcinius sprendimus bus pailgintas valymo įrenginio veikimo laikas, norint išvengti sistemos užsikimšimo. Pritaikius patobulintą daugiakanalį cikloną pramonėje, bus įmanoma pašalinti smulkiadisverses kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų srauto, mažinant šių teršalų emisijas į aplinkos orą.

Ginamieji teiginiai

1. Daugiakanaliame ciklone dujų srauto temperatūrai padidėjus nuo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, santykinis drėgnis eksponentiškai mažėja nuo 95 % iki 6,6 %.

2. Padidinant dujų srauto greitį 2 kartus – nuo 8 m/s iki 16 m/s, patobulinto daugiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas padidėja 3 kartus (nuo 110 Pa iki 335 Pa).
3. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto, užteršto atitinkamai 10 μm ir 2,5 μm kietosiomis dalelėmis, valymo efektyvumas sumažėja apie 2 kartus (nuo 81,3 % iki 50,5 %).
4. Agresyviųjų dujų srauto greičiui patobulintame daugiakanaliame ciklone modeliuoti, taikant $k-\omega$ turbulentinės klampos modelį, sumažėjus kiekvienos skaičiavimo tinklelio ląstelės tūriui 1,15 karto (nuo 0,156 cm^3 iki 0,136 cm^3), santykinė paklaida, lyginant su eksperimentinių tyrimų rezultatais sumažėja iki 1,5 karto (nuo 10,7 % iki 7,7 %).

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra publikuoti 17 mokslinių straipsnių: septyni – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Clarivate Analytics Web of Science sąrašą (Baltrėnas, Pranskevičius & Chlebnikovas, 2014, Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014, Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2018); šeši – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, referuojamuose kitose duomenų bazėse (Baltrėnas, Vasarevičius, Kazlauskienė & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2012, 2015, 2016, 2017; Danilenkaitė, Chlebnikovas & Vaitiekūnas, 2013); keturi – konferencijų pranešimų leidiniuose (Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2011; Vaitiekūnas, Petraitis & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas and Baltrėnas, 2017a, 2017b).

Gautas Europos patentas „Cylindrical Multi-Level Multi-Channel Cyclone-Filter“, patento numeris EP2886182 (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2019). Gauti Lietuvos Respublikos patentai – „Daugialygis daugiakanalis cilindrinis ciklonas-filtru“, patento numeris LT 6225B (Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2013) ir „Daugiakanalis ciklonas – filtru agresyviosioms dujoms nuo kietųjų dalelių valyti“, patento numeris LT 6479B (Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2017).

Disertacijoje aprašytų atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dvylikoje mokslinių renginių:

- Respublikinėse jaunųjų mokslininkų konferencijose „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2016–2019 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Environmental and Climate Technologies „Conect 2016“ 2016 m. Rygoje, Latvijoje;
- Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Environmental Engineering“ 2017 m. Vilniuje;
- Tarptautinėse mokslinėse–praktinėse konferencijose „Žmogaus ir gamtos sauga 2017“ ir „Žmogaus ir gamtos sauga 2018“, 2017–2018 m. Kaune;

- Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „35th UIT Heat Transfer Conference“ 2017 m. Ankonoje, Italijoje;
- Respublikinėse konferencijose „Šilumos energetika ir technologijos-2018“ ir „Šilumos energetika ir technologijos – 2019“, 2018–2019 m. Kaune;
- Tarptautinėje doktorantų vasaros mokykloje, 2016 m. Vilniuje.
Stažuotasi Markės politechnikos universitete, Ankona, Italija, 2017 m. birželio–rugpjūčio mėn.

Disertacijoje aprašytų tyrimų rezultatai buvo įvertinti Lietuvos mokslų akademijos Jaunųjų mokslininkų ir doktorantų 2018 metų mokslinių darbų konkurso laureato diplomu, Vilnius, 2019 m.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir rekomendacija, literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Darbo apimtis yra 214 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudota 37 numeruotos formulės, 51 paveikslas ir 8 lentelės. Rašant disertaciją naudotasi 177 literatūros šaltiniais ir 20 autoriaus publikacijų.

Smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis sukeliamą oro taršą, daugiakanalių ciklonų taikymo dujų valymui analizė ir agresyviųjų dujų srauto charakteristika

Kietosios dalelės yra vienas dažniausiai pasitaikančių teršalų, kurių emisijas sukelia vykstantys gamtiniai procesai, kurie veikia atmosferos oro kokybės lygį.

Skyriuje apžvelgiami kietųjų dalelių susidarymo ir sklaidos aplinkoje dėsningumai. Aprašomas kietųjų dalelių poveikis žmogui ir aplinkai. Aptariami atmosferos ore vykstantys procesai, vykstant užterštų kietosiomis dalelėmis srautų emisijoms. Pateikta ciklonų skirtingo tipo konstrukcijų apžvalga bei aprašyti jų veikimo ypatūmai šalinant įvairaus tipo kietąsias daleles esant skirtingoms sąlygoms. Pateikiama daugiakanalių ciklonų apžvalga, juose vykstančių procesų parametrai bei jų pritaikymo galimybės. Aprašyti dujų srauto ciklonuose modeliavimo metodai bei naudojamos programos. Skyriaus tematika paskelbta dešimt autoriaus mokslinių straipsnių (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2018; Chlebnikovas and Baltrėnas, 2017a, 2017b; Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2015, 2016, 2017).

1.1. Smulkiadispersijų kietųjų dalelių susidarymas, taršos šaltiniai aplinkoje bei užterštumo problemos

Užterštų kietosiomis dalelėmis gamybinių dujų (oro) srautų valymas ciklonuose – sudėtingas šilumos bei masės mainų procesas, kuris mokslininkų tiriama jau virš 120 metų (Nazaroff and Weschler, 2004; Ватин и Стрелец, 2003).

Dujos, kuriose yra aptinkamos SDKD, yra priskiriamos prie dujų dispersinių (aerodispersijų) sistemų. Pastarosios sistemos, arba aerozoliai, yra sistemos, kuriose aplinką sudaro dujų srautas, o pakibusi fazė – kietosios (dulkės) arba skystos (rūkas) dalelės. Pramoninių procesų metu susidarančios dispersinės dujų sistemos yra sudėtingos, nes aplinka sudaryta iš skirtingų dujų mišinio, o esančios dalelės – skirtingo agregatinio būvio ir polidispersės (Ehrlich, C. et al., 2007).

Kietųjų kūrų grūdėliai, kurių dydis vyrauja tarp 1–150 μm intervalo, yra vadinami kietosiomis dalelėmis. SDKD yra smulkesnė frakcija, kai kietųjų dalelių skersmenys yra 1–10 μm . Smulkiausia kietųjų dalelių frakcija – ultramikroskopinė ir kietųjų dalelių skersmuo siekia 0,001–0,1 μm , yra vadinama dūmais. Tai yra dalelės, sudarančios kietuosius kūnus arba skysčio lašelius, kurių dydis yra mažesnis nei 0,3–0,5 μm . Tokios dalelės susidaro organinio kuro (anglies, žibalo, medienos, tabako ir kt.) nevisiško degimo metu (Nadzeikienė, 2012).

Dažniausiai mechaninio apdorojimo metu dujų sraute išsiskiriančios kietosios dalelės yra 5–50 μm skersmens ir didesnės; terminio arba cheminio technologinių procesų metu SDKD yra mažesnės nei 3 μm , o degimo metu – 5–70 μm . Ypač smulkios SDKD, iš kurių susideda besikondensuojantys aglomeratai, dažniausiai jungiasi tarpusavyje, sudarydami dribsnio pavidalo kietąsias daleles, taigi, kitaip tariant, vyksta kietųjų dalelių koaguliacija (Зимон, 1976).

SDKD išsiskiria iš įvairių žaliavų ir pusfabrikačių, vykstant mechaniniams, terminiams ir cheminiams technologiniams procesams, kai kartu su dujų (oro) srautais išsiskiria juose esančios SDKD. Pastarosios išsiskiria vykstant džiovinimo procesams statybinių medžiagų (cemento, klinkerio) ir kt. žaliavų pramonėje, iš malūnų, degimo krosnių, kai teršalų emisija gali siekti iki 10 kg/val., taip pat iš pneumatinio transporto ir darbo aplinkos aspiracinių sistemų ir kt. (Gopani and Bhargava, 2011). Pagrindinė tokios taršos priežastis – mechaninis kietųjų medžiagų apdorojimas, perkrovimas ir birių medžiagų transportavimas (Bernstein et al., 2008).

SDKD emisijos kartu su pramoniniais, kokso dūmais ir kt., išsiskiriančiais iš generatorių ir pan., susidaro dėl vykstančių degimo procesų (Nussbaumer, 2003; Vaitiekūnas and Banaitytė, 2007). Kaip nevisiško organinės medžiagos ir kuro degimo proceso produktas, nesant pakankamam deguonies kiekiui, susidaro ir yra išmetami suodžiai. Jeigu dujų sraute yra kitų dujinių medžiagų, tai auštant dujų srautui iki tam tikros temperatūros, šie garai kondensuojasi ir susidaro skystos

arba kietos fazės medžiagos, kurios gali suformuoti bendrus darinius su jau esančiomis dujų sraute SDKD. Dujų sraute esant skirtingo agresyvumo medžiagoms gali susidaryti agresyviųjų dujų srautas. SDKD fazės, susidariusios kondensacijos metu, pavyzdžiai gali būti: sieros rūgšties rūkas, susiformavęs garinimo ir džiovinimo procesų metu, iš generatorių ir kokso pramoninių dūmų išsiskyręs dervų rūkas, spalvotųjų metalų (cinko, alavo, švino ir kt.) garai, kurių yra žema garavimo dujose temperatūra yra žema (Hyunhee, Jang & Shin, 2011).

Dauguma toksiškų ir kenksmingų medžiagų išsiskiria chemijos pramonėje. SDKD išsiskiria aerozolių ir dulkių pavidalu kartu su vanadžio pentoksido, kalcio druskomis, kalkėmis, sieros dulkėmis ir kt., kurių emisija gali siekti iki 50 g/s. Trašų gamyklos išskiria didelius kiekius pavojingų teršalų, kai pagaminus 1 toną fosfatų į atmosferą išmetama 100 g floro aerozolių.

Organinių SDKD išsiskyrimas yra būdingas naftos produktų degimo metu, pirolizės būdu naftos perdirbimo ir naftos chemijos bei kt. pramonės šakose. Šiuo atveju išsiskiria labai skirtingos SDKD surištos kartu su alifatiniais ir aromatiniais angliavandeniliais ir rūgščių druskomis.

Visos žaliavos, kurios naudojamos cemento gamyboje, pvz., AB „Akmenės cementas“, po išgavimo karjeruose ir pervežimo į gamyklą yra džiovinamos, skaldomos ir smulkinamos, taigi taip yra didinama cemento gamyboje naudojamų medžiagų mišinyje paviršiaus sąveika. Daugiau nei 80 % SDKD, kurios išsiskiria į atmosferą, susidaro besisukančiose krosnyse (autoklavuose), kita dalis – cemento ir žaliavų malūnais, skaldymo-džiovinimo įrenginiais, taip pat silosais. Vienos klinkerio tonos išgavimo metu į atmosferą išsiskiria 50–120 kg SDKD, kurių dydis siekia 0,1–10 μm (Canpolat, Atimtay, Munlafalioglu, Kalafatoglu & Ekinci, 2002). Medienos, stikloplastikų, grafito ir kt. nemetalinių medžiagų apdorojimo metu SDKD emisijos siekia iki 1 kg/val. (Portet-Koltalo, Preterre & Dionnet, 2011).

Mineralinio kuro degimo produktai termofikacinėse elektrinėse, katilinėse ir kt. yra vieni iš pagrindinių atmosferos taršos šaltinių. Pavyzdžiui, 1 MWh elektros energijos gamybos metu termofikacinėse elektrinėse išsiskiria 10 kg pelenų. Energetikos įrenginiai visame pasaulyje kasmet išmeta į atmosferą apytiksliai 1 mlrd. t pelenų (Nussbaumer, 2003).

Dulkėtas agresyviųjų dujų srautas, pasižymintis ypač dideliu drėgniu ir neaukšta temperatūra, susiformuoja vykstant įvairiems džiovinimo procesams, tokiems, kaip, pavyzdžiui, UAB „Lignineko“ technologinėje linijoje. Didelio drėgnio ligninas yra džiovinamas džiovyklų būgnuose ir paruošiamas kaip biokuras. Šio technologinio proceso metu dujų srauto santykinis drėgnis siekia virš 95 %, temperatūra kinta 60–65 °C ribose. Lignino kietųjų dalelių koncentracija siekia iki 700 mg/m³.

Žemės ūkyje gaminama produkcija sąlygoja atliekų, tokių kaip: šiaudai ir kt., susidarymą. Šio tipo tinkamai paruošta biomasė gali būti efektyviai panaudojama

kaip biokuras. Energetikos reikmėms galima panaudoti apie 33 % bendro susidarancio šiaudų kiekio (Baltijos biomasės tinklas, 2007). Lietuvoje tokio tipo katilai naudojami vis dažniau, pavyzdžiui, AB „Kaišiadorių paukštynas“ katilinėje ir AB „Umega“ įmonėje. Įprastai katiluose, deginant šiaudų ryšulius, biomasė išdžiovinama iki 10–25 % (optimalu, kai 15 %). Tokio kuro peleningumas siekia apytiksliai 5 %, o šiaudų šilumingumas – iki 16 MJ/kg. Degimo metu išsiskiria aerozoliai (lakūs pelenai) bei susidaro pelenai. Sudeginus 1 t šiaudų susidaro apytikriai 15–20 kg pelenų, tuo tarpu deginant medieną arba anglį, emisijos atitinkamai yra 10–15 kg ir 150–200 kg. Susidarantys pelenai dėl žemos lydymosi temperatūros sutrikdo degimo procesą, nes šlakas gali susidaryti jau esant 800–850 °C temperatūrai. Susidaranciu pelenų sudėtyje yra maistingųjų (druskų pavidalo) medžiagų: daugiausia kalio, fosforo ir kalcio. Todėl šiaudai aplinkosauginiu požiūriu yra panašūs į medieną, nors ir prastesni už gamtines dujas, tačiau žymiai geresni už anglį. Šiaudų panaudojimo privalumas tas, kad nesusidaro šiltnamio efektą sukeliančios dujos (Evald, 2014).

Mokslininkų T. Ališausko, G. Viselgos ir A. Jasinsko (2012) eksperimentiniais tyrimais nustatyta santykinio drėgnio įtaka aplinkos taršai, kietojo kuro katilė deginant pjuvenas. Gauti rezultatai parodė, kad drėgniui padidėjus nuo 30 % iki 70 %, dujinių teršalų emisija padidėja net 13 kartų. Ištirta (Ambrulevičius, 2010), kad akmens anglį keičiant biomase, kietųjų dalelių emisiją galima sumažinti iki 10 kartų, o bendras emisijų lygis priklauso nuo katilo reguliavimo ir kuro savybių (Xu, Zhang, Shao & Kang, 2016).

Bendro vėdinimo sistemos nėra efektyvios, sprendžiant darbo patalpų dulkėtumo problemas. Dažniausiai susidarancios kietosios dalelės turi būti pašalintos arba atskirtos iš srauto susidarymo šaltinyje, panaudojant vietinius nusiurbtuvus (Shi, Ekberg & Langer, 2013). Todėl pramonės patalpų vėdinimo sistemos dažnai yra projektuojamos, neatsižvelgiant į operacijų metu išsiskiriančių teršalų kiekius, apsiribojant tinkamos oro kaitos rodikliais. Taip daroma ir todėl, kad yra labai sudėtinga apskaičiuoti išsiskiriančias SDKD emisijas darbo patalpose. Apie darbo vietų dulkėtumo nustatymą ir vėliau tinkamą taršos mažinimą dažniausiai sprendžiama pagal atliekamas operacijas ir jų galimą taršos intensyvumą: intensyvi – skaldymas ir malimas, smėliavimo arba birių medžiagų perkrovimo darbai; reikšminga – šlifavimas, presavimas, pakavimas. Mažų taršos intensyvumu pasižymi – tekstilės ir popieriaus pramonė.

Aplinkos oro monitoringo vykdymas yra vienas iš būdų aplinkos oro taršą vertinti bei esamas taršos problemas spręsti. Aplinkos oro kokybės matavimai yra pagrindinis oro kokybės vertinimo metodas. Naudojant oro kokybės monitoringą gaunama svarbi informacija, reikalinga oro kokybės politikai parengti ir įgyvendinti bei oro kokybei valdyti. Oro kokybės tyrimų duomenys naudojami sveikatos apsaugai, teritorijų ir ūkio plėtros planavimui, mokslo reikmėms, taip

pat ieškoma optimalių būdų, galimų ekologinių avarijų ir katastrofų padariniams likviduoti (Europos Komisija, 2019).

Vieni pagrindinių aplinkos oro taršos šaltinių Europoje, kaip ir visame pasaulyje, yra kelių transportas ir pramonės įmonės. Dideli teršalų kiekiai susidaro ir energijos bei šilumos gamybos metu. Visoje Europoje matomos pagrindinių aplinkos oro teršalų (vadinamųjų oro kokybės indikatorių) koncentracijų kitimo tendencijos. Didžiausi išmestų kietųjų dalelių kiekiai tenka miestams, kuriuose vyksta pramonės gamyba, bei didiesiems miestams, kuriuose juda intensyvūs automobilių transporto srautai (Matuliauskaitė, 2009).

Pagal atliktus tyrimus yra nustatyta, kad pramonės sukeliama pasaulinė SDKD tarša sudaro 35 %, buitinių šildymo sistemų – apie 23 %. Pavyzdžiui, vien tik Niujorke kasdien yra išmetama daugiau nei 300 t pramonėje susidarančių SDKD (Posner and Pandis, 2015).

Aplinkos oras labiausiai teršiamas deginant kurą įvairiose katilinėse, termofikacinėse elektrinėse ir pan., o tai sudaro net 31,4 % visos SDKD taršos. Šių procesų metu išsiskiria kietosios dalelės, kurių dydis, priklausomai nuo kuro ir deginimo įrenginio, dažniausiai siekia 0,1–200 µm. Ypač didelė tarša yra sukeliamą objektuose, kuriuose yra deginamas didelio peleningumo kuras, t. y. akmens anglis ir jos atmainos, taip pat medžiagų gryninimo fabrikuose, metalurgijos, cemento, magnezito ir techninės anglies gamyklose (Jia and Lighty, 2012). Pastarosiose pramonės šakose išsiskiriančios SDKD pasižymi labai skirtinga chemine sudėtimi. Didelės kietųjų dalelių emisijos nustatomos chemijos ir tekstilės pramonėje, įvairių statybinių medžiagų gamyklose. Nusėdusios SDKD pramonės rajonuose savo sudėtyje turi apytiksliai 20 % geležies oksido, 15 % silikatų ir 5 % suodžių, įvairių bierių medžiagų – kvarcų, lauko špatų, asbesto, gipso, taip pat įvairių metalų priemaišų (švino, vanadžio, molibdeno, arseno, stibio ir kt.) (Guo et al., 2017; Vamvuka, Trikouvertis, Pentari, Alevizos & Stratakis, 2017).

Darbo zonoje esančias kietąsias daleles galima apibrėžti kaip pakibusią SDKD visumą, kurios susidaro technologinių procesų metu ir sukelia neigiamą poveikį dirbančiam personalui. Didžiausiu užterštumu darbo vietose pasižymi litavimo, virinimo dirbtuvės, statybos objektai (ypač uždaros patalpos ir barai), cemento ir plytų gamyklos, šachtos, medžio apdorojimo, farmacijos pramonė ir kt. (Zhang, Long, Liu & Chen, 2016).

Vertinant bendrą aplinkos oro taršą SDKD, pramonės objektai sudaro ketvirtadalį emisijos ir siekia 26,5 %, Lietuvoje šią dalį daugiausiai sudaro cemento ir stiklo pramonė. Darbo zonose nustatomos aukštos koncentracijos SDKD, kurių sudėtyje yra silicio, geležies ir cinko oksidų, bario, arseno, švino ir augalinės kilmės žiedadulkių, taip pat kancerogeninio poveikio angliavandenių (Xu et al., 2016). Pramonės emisijose, esant dideliu dujų srauto greičiui ir aukštai temperatūrai, yra aptinkamos didelės koncentracijos, o kietųjų dalelių dispersiškumas yra gana plataus intervalo ir gali siekti nuo 0,1 µm iki 120 µm.

Pasaulinės sveikatos organizacijos institucijos atmosferos taršą SDKD (KD_{10}) vertina kaip vieną iš svarbiausių rodiklių, siekiant nustatyti globalinį Žemės planetos užterštumą SDKD bei jo įtaką žmogaus sveikatai. Pripažįstama, kad tarša SDKD yra didžiausia Viduržemio jūros ir Pietryčių Azijos regionuose (atitinkamai $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ir $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2017 m.)). Tai siejama su šiuose regionuose esančių šalių ekonomine padėtimi, dėl kurios veikiantys šalių teritorijose pramonės objektai negali tinkamai išvalyti gamybinių dujų nuo SDKD. Taip pat išlieka dalis stacionarių taršos šaltinių, kurie nėra įregistruoti, todėl jų tarša negali būti tinkamai sukontroliuota. Azijos regiono šalyse intensyvus ekonomikos ir pramonės augimas sudaro sąlygas, kai siekiant didesnio ekonominio naudingumo yra vengiama aplinkosauginio saugumo. Panaši situacija išlieka vakarų Ramiojo vandenyno regione, t. y. Pietų Amerikos valstybėse, kuriose KD_{10} koncentracijos siekė $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Zosima, Tsakanika & Ochsenkuhn–Petropoulou, 2017).

Vertinant bendrą oro taršą Lietuvoje 2007–2015 metais, remiantis Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, galima teigti, kad KD_{10} ir $KD_{2,5}$ teršalų koncentracijos aplinkos ore apytiksliai atitinkamai padidėjo 20 % ir 90 %. Tuo pačiu tarša iš stacionarių taršos šaltinių, skirtingai nuo SDKD rūšies, pakito įvairiai: kietosios dalelės (A) (šiluminės ir elektros energijos metu, įvairios paskirties katilinių išmetami teršalai) – padidėjo 40 %, kietosios dalelės (B) (gamybos procesų metu, deginant organinį kurą) – sumažėjo 20 %, kietosios dalelės (C) (cheminių reakcijų metu) – nepakito (Aplinkos apsaugos agentūra, 2019).

Vertinant SDKD taršą Lietuvoje, galima pabrėžti, kad $KD_{2,5}$ emisijos 2012–2014 metais ypač ryškiai didėjo, be to, ir vėliau nuo 2015 metų stebima šių teršalų didėjimo tendencija. Tarša KD_{10} tipo teršalais išlieka gana pastovi, o jų koncentracijos kito 2009–2015 m. $16\text{--}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ribose. Galima išskirti tai, kad kasmet dienų skaičius, kai buvo viršyta leistina paros norma, išlieka labai didelis ir siekia 60–80 dienų. Didžiausia tarša kasmet nustatoma vasario–balandžio mėnesiais. $KD_{2,5}$ koncentracija 2009–2015 m. laikotarpiu kito $12\text{--}26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ intervalu, 2015 m. pagal bendrą stebėjimo lygį ši vertė nežymiai sumažėjo ir buvo lygi $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Didžiausia tarša kietosiomis SDKD užfiksuota sausio–kovo mėnesiais (Aplinkos apsaugos agentūra, 2019).

Analizuojant duomenis apie naudojamus valymo įrenginius Lietuvoje, galima apibendrinti, kad visų rūšių kietųjų dalelių kiekiai, patekę į valymo įrenginius 2009–2013 m. laikotarpiu, didėjo 10–40 %, o išmestas į atmosferą kiekis kietųjų dalelių (A) – sumažėjo 20 %, kietųjų dalelių (B) – nepakito, o kietųjų dalelių (C) – padidėjo 15 % (Aplinkos apsaugos agentūra, 2019). Šie rezultatai rodo tai, kad SDKD tarša Lietuvoje išlieka panaši, o tarša $KD_{2,5}$ tipo teršalais yra didėjančios tendencijos. Tarša iš stacionarių taršos šaltinių, skirtingai nuo technologinių procesų, kinta įvairiai. Didžiausi kiekiai išsiskiria (C) rūšies teršalų, kurių emisijų tendencija išlieka panaši per septynerių metų laikotarpį (2009–2015 m.). Daugiausia dėmesio turi būti skiriama kietųjų dalelių (A) tipo

emisijoms, kurios išsiskiria energetikos sektoriuje, mažinti, kadangi yra stebimas šių teršalų emisijų padidėjimas. Naujų technologijų bei efektyvių valymo įrenginių diegimas 2009–2013 m. laikotarpiu suteikė galimybę ženkliai sumažinti aplinkos taršą kietosiomis dalelėmis, ypač tai akivaizdu energetikos sektoriuje, kai buvo pasiektas 27,3 % emisijų sumažėjimas pagal faktiškai sugaudytų kietųjų dalelių (A) kiekį. Tyrimai parodė, kad emisijos išlieka nemažos, todėl efektyvių valymo įrenginių taikymas išliks kaip labai svarbus aplinkosauginis uždavinys (Aplinkos apsaugos agentūra, 2019).

Aplinkos oro tarša palaipsniui yra mažinama, nes skiriama lėšų senų katilinių modernizavimui, įrengiant naujus katilus, diegiant efektyvesnes valymo priemones, rekonstruojant šilumos trasas bei įdiegiant naujas technologinių procesų valdymo sistemas. Siekiant didinti atsinaujinančių energijos šaltinių dalį, gamtinių dujų katilų apkrovos yra mažinamos, pakeičiant juos biokuro katilais. Taip pat, siekiant sumažinti aplinkos oro taršą, labiausiai teršiantis SDKD kuras, t. y. mazutas, anglis ir skalūnų alyva, yra keičiami biokuru, tačiau vis dar daug katilinių išlieka eksploatuojamos įprastinėmis sąlygomis (Riaza, Gibbins & Chalmers, 2017; Dong, Yang, Ou, Lu & Cheng, 2018). Katilinėse naudojamame mazute yra apie 2,5 % sieros, todėl atmosfera teršiama SDKD ir kt. cheminiais teršalais kur kas labiau nei naudojant kitą kurą. Pašalinus mazute esančius cheminius junginius, gerokai sumažėtų aplinkos tarša, bet tada energijos objektų kapitaliniai įdėjimai padidėtų 30 %, o technologškai pašalinus 0,5 % šių junginių – skystojo kuro kaina pakiltų 15 %. Tokią taršą būtų galima sumažinti geriau reguliuojant katilinių kūrimo režimą.

Europos Sąjungoje, nustačius naujus reikalavimus atliekoms tvarkyti, aktyviai plėtojamas atliekų deginimo gamyklų diegimas. Kadangi deginant atliekas išsiskiria skirtingos kilmės SDKD, kartu su deginimo įrenginiais labai svarbu įrengti efektyvius valymo įrenginius, kurie galėtų būti eksploatuojami tokiomis sąlygomis, kad būtų išvengta smulkių ir ypač smulkių SDKD patekimo į aplinkos orą.

Lietuvoje tarša kietosiomis dalelėmis (KD_{10}) iš stacionarių taršos šaltinių 2007 metais buvo 4100 tonų, 2008 metais išliko panaši, o 2009 metais buvo nustatytas kietųjų dalelių emisijų iš stacionarių taršos šaltinių sumažėjimas. Nuo 2011 metų, kai KD_{10} tarša buvo 4300 tonų, kasmet emisijos mažėja (Lietuvos Respublikos statistikos..., 2019).

Atsižvelgiant į statistinius duomenis, galima teigti, kad tiek Lietuvos, tiek Europos ir pasaulio ekonomikai atsigavus ir pasiekus ikikrizinį lygį, tarša kietosiomis dalelėmis, o ypač SDKD, išlieka viena iš svarbiausių aplinkosauginių problemų. Naujų energetikos pramonės objektų atsiradimas, senų katilinių, technologinių linijų modernizavimas gali tik iš dalies išspręsti šias problemas, nes nustatyta, kad pramoninių dujų srautų emisijų sumažėjimas gali būti pasiektas tik efektyviai vykdant aplinkosauginę politiką – laiku atlikus sistemų modernizavimą

ir įdiegus bei pritaikius geriausius SDKD šalinimo iš dujų įrenginius. Sukurti didelio efektyvumo įrenginiai gali būti pritaikyti tik tam tikromis sąlygomis, kurios gamybos metu ne visada gali būti išlaikytos nepakitusios. Taip pat svarbu, kad valymo įrenginiai nuo SDKD turėtų nesudėtingą konstrukciją ir dėl to būtų paprastesnė jų eksploatacija. Be abejo, vienas pagrindinių valymo įrenginių naudojimo aspektų yra jų prieinamumas bei kaina. Serijinėje gamyboje išlaidos efektyviems valymo įrenginiams kurti, projektuoti ir gaminti yra gana didelės, todėl akivaizdu, kad labai brangūs įrenginiai nebus diegiami vien ekonominiu požiūriu, todėl jie nepasieks vartotojų ir negalės būti eksploatuojami aplinkos oro taršai mažinti.

1.2. Smulkiadispersijų kietųjų dalelių savybės bei poveikis aplinkai ir žmogui

Kietųjų dalelių tankis yra skirstomas į tikrąjį tankį, supiltų kietųjų dalelių tankį ir tariamąjį tankį. Kaip rodo atlikti tyrimai (Fazilat et al., 2012), lygių monolitinių kietųjų dalelių tariamasis tankis sutampa su tikruoju. Linkusios koaguluoti kietosios dalelės pasižymi mažesniu tariamuoju tankiu, lyginant su tikruoju. Pagal atliktus skirtingų mokslininkų tyrimų rezultatus, prieita prie išvados, kad daugelyje pasitaikiusių atvejų eksperimentinis tariamojo tankio nustatymas neatliekamas. Supiltų kietųjų dalelių tankis yra naudojamas nustatant tūrį, kurį kietosios dalelės užima sausų valymo įrengimų bunkeriuose. Susigulėjusių kietųjų dalelių tankis išauga 1,2–1,5 karto.

Užsienio autoriai nagrinėjo skirtingų medžiagų adhezinės savybės ir nustatė, kad padidėjęs sulipimas gali sąlygoti dalinį arba visišką dulkelio oro valymo aparatų užsikimšimą. Tyrimai parodė, kad kuo mažesnis kietųjų dalelių skersmuo, tuo lengviau kietosios dalelės prilimpa prie įrenginio paviršiaus. Kietosios dalelės, kurių 60–70 % turi mažesnę negu 10 μm skersmenį, elgiasi kaip limpančios, nors tos pačios kietosios dalelės, kurių skersmuo didesnis negu 10 μm, pasižymi geru birumu.

Adhezijos jėgos atsiradimas ir jos dydis priklauso nuo aplinkos sąlygų, kuriose yra SDKD. Tokio poveikio parametrai yra aplinkos temperatūra, šioje aplinkoje ir ant sąlyčio paviršių esančios adsorbuojančios medžiagos, reiškiniai, vykstantys vakuomo sąlygomis, taip pat SDKD ir paviršiaus kontakto laikas. Yra nustatyta, kad aplinkos temperatūrai didėjant, metalo SDKD (10 μm skersmens aukso kietosios dalelės) adhezija didėja ir ypač pasireiškia esant virš 100 °C temperatūrai. Pavyzdžiui, esant 100 °C dulkelio paviršiaus temperatūrai, adhezijos jėga lygi $2 \cdot 10^{-3}$ N/m, 200 °C – $8 \cdot 10^{-3}$ N/m, 300 °C – $30 \cdot 10^{-3}$ N/m ir 400 °C – $50 \cdot 10^{-3}$ N/m (Зимон, 1976). Adhezijos jėgos didėjimas vyksta dėl kontakto zonos su paviršiumi suminkštėjimo. Yra atlikta tyrimų, nagrinėjančių adhezijos jėgos

pokytį, esant vienodai paviršiaus temperatūrai, tačiau skirtingai aplinkos temperatūrai. Tokiu atveju, kylant aplinkos temperatūrai, kuri nulemia prilipusių prie paviršiaus kietųjų dalelių nutrūkimą, adhezijos jėgos mažėja. Tai paaiškinama tuo, kad padėjus įkaitusį, pvz., iki 400 °C temperatūros, paviršių į vėsesnę aplinką, vyksta „kietųjų dalelių pagavimas“ ir adhezijos padidėjimas. Pakėlus aplinkos temperatūrą žymiai sumažėja „kietųjų dalelių pagavimas“, o tai sumažina adheziją (Зимон и Андрианов, 1978). Yra svarbu paminėti, kad tuo atveju, kai konstrukciniai elementai iš darbo sąlygų (kai temperatūra – 20 °C, oro santykinis drėgnis 50–60 %) yra perkeliama į aplinką su žemesne nei 0 °C aplinkos temperatūra, adhezijos jėgos smarkiai padidėja dėl „kietųjų dalelių prišalimo“ prie paviršiaus. Tai vyksta dėl drėgmės kondensacijos tarp kontaktuojančių paviršių. Beje, „prišalimo“ reiškinys vyksta tik su metaliniais paviršiais ir skiriasi nuo adhezijos stipresnėmis sąveikomis (Зимон, 1976).

Kietųjų dalelių adhezija priklauso ir nuo paviršiaus, su kuriuo vyksta sąveika, glotnumo bei paviršiaus švarumo klasės, t. y. gebančių adsorbuoti pašalinių medžiagų, pavyzdžiui, paviršių dengiančios medžiagos, drėgmė ir kt. buvimas. Paviršiaus glotnumas gali būti didinamas ne tik išvengiant pašalinių medžiagų, tačiau padengiant paviršius specialiomis antifrikcinėmis priemonėmis, mažinančiomis trinties jėgas (Андрианов, 1981). Tokios medžiagos susilpnina aerodinaminį paviršiaus pasipriešinimą judančiam dujų srautui, sumažina kietųjų dalelių adheziją trinties jėgai, pakeičia savo pobūdį dėl papildomo slydimo, tačiau visiškai išvengti adhezijos neįmanoma.

Viena iš adhezijos rūšių yra autohezijs, kuri apibrėžiama kaip dviejų vienodų besiliečiančių paviršių sąveika. Tokia adhezijos forma pasireiškia tarp nusėdusių ant paviršių kietųjų dalelių, kurios suformuoja antrinius sluoksnius, tuo tarpu adhezijos sluoksnis yra pirminis. Kietųjų dalelių autohezinės savybės labiausiai priklauso nuo jų prigimtios ir paviršinio sluoksnio savybių: nuo laisvų krūvių bei radikalų atsiradimo.

Kietųjų dalelių skersmuo yra pagrindinis parametras, nes daugumos kietųjų dalelių gaudymo įrenginių pasirinkimas priklauso būtent nuo šios charakteristikos. Koaguliacijos proceso metu pirminės kietosios dalelės susijungia į aglomeratus, t. y. padidėja.

Kietųjų dalelių atmosferoje apibūdinimas ir pavyzdžiai pateikiami 1.1 lentelėje.

Dispersinės sistemos charakteristikai naudojamas medianinis kietųjų dalelių skersmuo ir dispersija. Medianinis kietųjų dalelių skersmuo – kietųjų dalelių skersmuo, kuriam esant kietųjų dalelių masė, didesnė ir mažesnė už nustatytą skersmenį, sudaro po 50 %.

1.1 lentelė. Susidarančių kietųjų dalelių apibūdinimas ir pavyzdžiai (Jayarathne, Stockwell, Yokelson, Nakao & Stone, 2014)

Table 1.1. Resulting particle characterization and examples (Jayarathne, Stockwell, Yokelson, Nakao & Stone, 2014)

Apibūdinimas	Pavyzdžiai
Labai mažos 0,01–5 μm	Dažų pigmentai, kietojo kuro degimo dūmai, dulkės
Didesnės 5–100 μm	Statybinių medžiagų (cemento, klinkerio) dulkės, liejyklų dulkės, anglies dulkės
Skystojo būvio 5–10 μm	Rūkas, susiformavęs kondensacijos metu
Biologinės kilmės 0,001–0,01 μm	Žiedadulkės, sporos
Susiformavusios cheminių reakcijų metu 0,001–100 μm	Cheminiai junginiai ir tirpale esančios kietosios dalelės, kurioms reaguojant su atmosferos vandeniu susiformuoja rūkas

Visas kietąsias daleles, kurios išsiskiria į atmosferą, galima išskirti į tokias grupes:

- a) stambios dalelės, kurios praėjus laikui nusėda;
- b) dalelės, kurios sunkiai arba visai nenusėda;
- c) mikroskopinės dalelės, kurios nenusėda.

Vidutinis pirmosios grupės kietųjų dalelių skersmuo lygus 20 μm . Jos, išmestos į atmosferą, dažniausiai yra nešamos oro srautais ne aukščiau kaip 3 km aukštyje.

Antrosios grupės kietųjų dalelių skersmuo – nuo 0,1 μm iki 2,5 μm . Veikiant elektrostatinėms jėgoms šios kietosios dalelės aglomeruojasi, koaguliuoja į stambesnes kietąsias daleles ir nusėda. Šios dalelės, esančios dujų sraute, gali atlikti efektyvaus kondensacijos branduolio vaidmenį garų aplinkoje, o esančios atmosferoje – sukelti kritulius.

Trečiosios grupės kietųjų dalelių skersmuo – mažesnis nei 1 nm. Jos gali sklirti per visus Žemės atmosferos sluoksnius.

Aeroliais dažniausiai vadinamos kietosios dalelės, kurių skersmuo yra 0,1–20 μm . Tokios dalelės dėl antropogeninės veiklos dažniausiai išsiskiria kaip metalo ir anglies (tarp jų ir suodžiai) SDKD. Didžiausias kiekis tokių kietųjų dalelių dūmų sraute susidaro deginant anglį arba mazutą.

Kartais kietųjų dalelių skersmuo charakterizuojamas plevenimo greičiu, kuris nejudančiame ore įvertina kietųjų dalelių laisvo kritimo greitį.

Dulkėto dujų srauto sąlytyje su konstrukcijų sienelėmis geba sukelti jų dilimą priklauso nuo medžiagos, sudarančios kietąsias daleles kietumo bei tankio, taip

pat nuo kietųjų dalelių skersmens, jų formos ir dujų srauto judėjimo greičio. Oro valymo sistemų sienelių nudilimas vyksta dėl kietųjų dalelių abrazyvumo – mechaninio abrazyvinio kietųjų dalelių poveikio. Abrazyvumo savybė įvertinama daugiakanalių ciklonų ir kt. valymo įrenginių gamybos metu, parenkant dujų srauto greitį, medžiagą, iš kurios gaminamas įrenginys, ir jo sienelių storį. Mokslininkų nustatyta, kad kietųjų dalelių abrazyvumas didėja jų dydžiui artėjant prie 80 μm , o toliau didėjant kietųjų dalelių skersmeniui, abrazyvumas mažėja. Norint įvertinti valymo įrenginio konstrukcijos specifikaciją, yra nustatomas abrazyvinis tarnavimo laikotarpis, t. y. eksploatacijos trukmė, kai bus pasiektas kritinis įrenginio paviršių sudilimo laipsnis. Medienos pelenų abrazyvumo koeficientų eksperimentiniais tyrimais (Вдовенко, Баяхунов и Чурсина, 1978) nustatyta, kad pelenų abrazyvumo koeficientas, priklausomai nuo biokuro tipo (anglys, medienos granulės ir kt.), kinta $1,5\text{--}9 \cdot 10^9 \text{ m}^2/\text{N}$ intervale. Mažai abrazyvių kietųjų dalelių kategorijai priskiriamos anglys, druskos, moliniai skalūnai, vidutinio abrazyvumo – kvarcinės klintys, didelio abrazyvumo – granitai, gneisai, korundo uolienos (Лешков, 2007). Nustatyta, kad kylant degimo temperatūrai, pasikeičia degimo produktų savybės. Esant aukštoms 100–300 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroms pelenų abrazyvumo koeficientas išlieka nedidelis (siekia $0,1\text{--}0,4 \cdot 10^{11} \text{ m}^2/\text{N}$). Tokios medžiagos pagal abrazyvumą priskiriamos pirmajai kategorijai, tuo tarpu, pavyzdžiui, ketvirtajai kategorijai yra priskiriamas kvarcinis smėlis, kurio abrazyvumo koeficientas lygus $1,5\text{--}2 \cdot 10^{11} \text{ m}^2/\text{N}$. Deginant įvairias anglys, ypač esant virš 1500 $^{\circ}\text{C}$ temperatūroms, susidaro kristalinės struktūros kvarcas, kuris pasižymi abrazyvumu. Kietųjų dalelių abrazyvumas kylant temperatūrai didėja iki tol, kol nėra pasiekama kritinė kietųjų dalelių lydymosi temperatūra.

Kietųjų dalelių abrazyvumas dažnai vertinamas pagal medžiagos, sudarančios šias kietąsias daleles, kietį. Metalų, taip pat ir medienos kietčiui nustatyti taikomas Brinelio metodas (įspaudimo būdas). Pagal atliktus tyrimus nustatyta, kad medienos kietis yra lygus 1–3 N/mm, lignino 4,5–5 N/mm, medienos pelenų – 3–5 N/mm, tuo tarpu nerudijančio plieno – 250 N/mm (Boskovic et al., 2005).

Smulkiadispersės kietosios dalelės, ypač mažesnės nei 5 μm , yra pavojingiausios, nes sukelia kvėpavimo takų ir plaučių lygas. Kietosios dalelės su aštriomis briaunomis gali sukelti akių ir odos traumas (Guarnieri and Balmes, 2014). Labai svarbi kietųjų dalelių savybė yra ta, kad jos geba absorbuoti aplinkos cheminius (sunkiuosius metalus, pesticidų aerozolius) bei biologinius teršalus, kuriuos perneša į kvėpavimo takus, iš kur šie gali būti absorbuoti į kraują ir audinius (Kim, Kabir, E. & Kabir, S., 2015; Morkūnienė, 2006). Be žmogaus kvėpavimo sistemos, kietosios dalelės veikia ir širdies bei kraujagyslių sistemą, sukeldamos įvairias širdies ligas (United States Environmental..., 2019). SDKD gali dirginti odą (užkemša prakaito liaukas, o tai sąlygoja pūlinių procesų atsiradimą), akių gleivinę (sukelia konjunktyvitus, kerakonjunktyvitus) (Baltrėnas and Morkūnienė, 2006; Pagano, de Zaiacomo, Scarcella, Bruni & Calamosca,

1998). Dažniausiai pasitaikančia bei pavojingiausia liga laikoma pneumokoniozė, kuri sukelia, įkvėpus užteršto oro, kurio sudėtyje randama laisvų SiO_2 junginių. Asbesto SDKD, kurios išsiskiria atitinkamose pramonės šakose, sukelia plaučių mezoteliomą (Chen and Hildemann, 2009; World Health Organisation, 2019).

SDKD, esančios aplinkos ore, išsklaido ir absorbuoja šviesą. Dėl to sumažėja atstumas, kuriuo galima atskirti toli esančių daiktų spalvas, skaidrumą, kontrastą. Smarkiai užterštuose rajonuose, palyginti su sąlygiškai švariais, natūralus apšvietimas gali sumažėti 20–50 % (EAA signalai, 2019; Particulate Matter, 2019).

Pagal Lietuvoje galiojančius teisės aktus, teršalų kiekis aplinkos ore vertinamas pagal Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ir Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2007 m. birželio 11 d. įsakymą Nr. D1-329/V-469 „Dėl teršalų, kurių kiekis aplinkos ore vertinamas pagal Europos Sąjungos kriterijus, sąrašo patvirtinimo ir ribinių aplinkos oro užterštumo verčių nustatymo“ (Lietuvos Respublikos aplinkos..., 2019a). Emisijos iš stacionarių taršos šaltinių yra ribojamos siekiant įgyvendinti direktyvos „Dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje“ (Direktyva 2008/50/EB) (European Union Law, 2019) tikslus bei atitikti Lietuvos teisės aktuose reglamentuojamų KD_{10} ir $\text{KD}_{2,5}$ (kietosios dalelės, kurių skersmuo atitinkamai iki 10 μm ir 2,5 μm) išmetamų teršalų koncentracijų vertes (Direktyva 1999/30/EB) (Europos Sąjungos leidinių..., 2019).

Bendrai oro taršai mažinti yra atnaujinami Lietuvos Respublikos normatyviniai dokumentai bei laikomasi ES direktyvų. Vis daugiau dėmesio skiriama ir biokurą deginančių įrenginių emisijoms mažinti. 2017 m. sausio 1 d. Aplinkos ministro įsakyme LAND 43-2013 išmetamiesiems teršalams yra nustatytos atnaujintos normos. Mažos nominalios šiluminės galios katilams (0,12–1 MW) kietųjų dalelių emisija, deginant biokurą, siekia 800 mg/Nm^3 . Tuo tarpu 1–20 MW galios biokurą deginantiems katilams nustatyta 700 mg/Nm^3 ir 400 mg/Nm^3 emisija, atitinkamai esamam ir naujam įrenginiui. Kai katilo galia siekia 20–50 MW – normos dar griežtesnės ir siekia 500 mg/Nm^3 ir 300 mg/Nm^3 , atitinkamai esamam ir naujam įrenginiui (Lietuvos Respublikos aplinkos..., 2019b).

ES Direktyvose (2010/75/ES ir 2015/2193) taikomos griežtesnės ribinės vertės, pvz., esamiems vidutinės galios (1–5 MW) kietos biomasės katilams kietųjų dalelių emisija neturi viršyti 50 mg/Nm^3 , o kurių galia didesnė kaip 5 MW bei 50–100 MW bendros šiluminės galios kurą deginantiems įrenginiams – 30 mg/Nm^3 (Europos Sąjungos leidinių..., 2019).

Kietųjų dalelių (KD_{10} ir $\text{KD}_{2,5}$) ribinės vertės patvirtintos Tarybos direktyvoje 1999/30/EB „Dėl sieros dioksido, azoto dioksido, azoto oksidų, kietųjų dalelių ir švino ribinių verčių aplinkos ore“ 1999 m. balandžio 22 d. ir aplinkos ministro bei sveikatos apsaugos ministro 2001 m. gruodžio 11 d. įsakymu Nr. 591/640 „Dėl aplinkos oro užterštumo normų nustatymo“ (Europos Sąjungos leidinių..., 2019).

Vadovaujantis ES direktyvų ir nacionalinių teisės aktų reikalavimais, KD_{10} koncentracijos vertinimui taikomos ribinės vertės:

- vidutinė metinė ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$);
- vidutinė 24 valandų ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), o 24 valandų (paros) vidurkio ribinė vertė neturi būti viršyta daugiau nei 35 dienas per kalendorinius metus.

Kietųjų dalelių KD_{10} metinė ribinė vertė Lietuvoje per 2010–2018 m. laikotarpį nekito (Europos Sąjungos leidinių..., 2019). Pasaulio sveikatos organizacija rekomenduoja $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ naudoti kaip orientacinę ribinę vertę metiniam KD_{10} vidurkiui vertinti. Aplinkos oro užterštumo normose nustatyta tik metinei $KD_{2,5}$ koncentracijai taikoma ribinė vertė – vidutinė metinė ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Lyginant su KD_{10} ribinėmis vertėmis, $KD_{2,5}$ leistinos ribos 2010–2017 m. laikotarpiu kasmet mažėjo nuo $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iki $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. (Aplinkos apsaugos..., 2017). Griežtėjant aplinkosauginėms normoms yra rengiami nauji standartai ir normos, kurie taikomi SDKD nustatymui, t. y. $KD_{2,5}$ ir KD_{10} . Todėl galima manyti, kad ateityje neišvengiamai bus parengti ir teisės dokumentai, skirti reglamentuoti aplinkos oro kokybę SDKD iš stacionarių taršos šaltinių. Tai papildomai pareikalaus efektyvesnių valymo įrenginių nuo smulkių ir ypač smulkių SDKD, kurių dydis siekia mažiau nei $10 \mu\text{m}$ ir $2,5 \mu\text{m}$.

1.3. Smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo iš dujų srauto būdai ir jų pritaikymas daugiakanaliuose ciklonuose

Vienas labiausiai paplitusių oro srauto valymo įrenginių, skirtų kietųjų dalelių šalinimui yra ciklonai (gr. *kyklon* – sukantis, sukuriuojantis). Itin platus šių įrenginių panaudojimas gali būti paaiškinamas ciklono konstrukcijos paprastumu, patikimumu eksploatacijos metu ir nedidelėmis kapitalinėmis bei eksploatacinėmis išlaidomis (Hideto, Kouichiro & Kunihiro, 2004; Xiong, Zhongli & Wu, 2014).

Iš pirmųjų rašytinių dokumentų yra žinoma, kad MAN įmonė Niurberge 1901 metais padavė paraišką ciklono konstrukcijos patentui gauti, kurį sukūrė L. Prandtlis (Ватин и Стрелец, 2003).

Ciklono tipo oro srauto valymo įrenginiai plačiai taikomi sausam užterštų dujų, išmetamų esant tam tikriems technologiniams procesams, valymui (nusausinimas, apdeginimas, aglomeracija, kuro deginimas ir t. t.). Ciklono veikimo principas pagrįstas kietųjų dalelių atsiskyrimu nuo dujų srauto, veikiant išcentrinėms jėgoms, kurios atsiranda dėl oro srauto sukurinio judėjimo įrenginio korpuso viduje (John and Reischl, 2012; Noh et al., 2018).

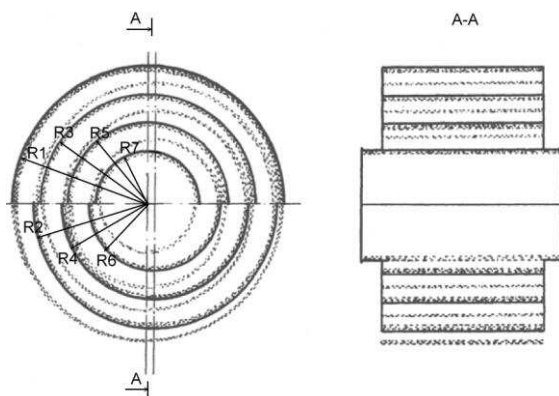
Daugiakanaliai ciklonai, turintys kreivalinijinius kanalus, sudarančius uždaruosius kontūrus, kaip ir įprastos tuščiavidurės konstrukcijos ciklonai, yra paprastos konstrukcijos, jų gamybos procesas nėra sudėtingas, nes jie lengvai sumontuojami bei eksploatuojami. Dėl minėtų privalumų daugiakanaliai ciklonai yra patikimi, universalūs bei ekonomiškai. Uždari kontūrai, turintys pusžiedžių tarpus, sudaro galimybę dujų srautui įtekėti ir ištekėti į / iš kanalų (Лепихин, Деревянченко, Буров и Серебрянский, 2004). Juose tranzitinis dujų (oro) srautas daugelį kartų filtruojasi pro grįžtamąjį iš dalies išvalytą dujų ir jame esančių SDKD srautą, cirkuliuojantį pusžiedžių tarpuose. Dėl šios sąveikos SDKD yra papildomai atskiriamos ir nukreipiamos į segmentinius žiedinius plyšius, ir nusodinamos ciklono bunkeryje. Kai kurie tyrėjai (Буров, А. А., Буров, А. И. и Гамолитч, 2007; Балан, Буров, А. И., Буров, А. А. и Серебрянский, 2002) teigia, kad daugiakanaliame ciklone vykstantis SDKD nusodinimas filtravimu ir veikiant išcentrinei jėgai – dujų valymo naujovė.

Vieno uždaro kontūro bei 180° dujų srauto posūkio kampo ciklonas buvo eksploatuojamas kaip pirminio valymo įrenginys anglies (suodžių) technologinėje gamybos linijoje. Prieš valymo įrangos modernizavimą buvo stebimas nuolatinis rankovinio filtro užsikimšimas bei pasipriešinimo didėjimas, dėl to buvo būtinas nuolatinis naujų filtro rankovių keitimas. Pirminio valymo įrenginio diegimas leido pailginti efektyvaus filtro eksploatavimo laikotarpį penkis kartus. Įrenginys, turintis tris cilindrinis pusžiedžius, šiluminėje elektrinėje už garo generatoriaus pakeitė vieną iš dvylikos CN–15 tipo ciklonų. Šio įrenginio našumas siekė 10 000 m³/h. Pelenų išmetimo koeficientas, veikiant CN–15 ciklonui, buvo lygus 27,5 %, o su įrenginiu, turinčiu tris kreivalinijinius kanalus, – 25 % (Серебрянский, 2004).

Mokslininkai, nagrinėjantys daugiakanalius ciklonus (Балан, Буров, А. А., Буров, А. И., 2000; Буров, А. А., Буров А. И., Силин и Цабиев, 2005; Серебрянский, 2009), tirdami šių įrenginių veikimą, analizavo savitą šio įrenginio konstrukciją. Nuosekliai išdėstytų bei sujungtų tarpusavyje kreivalinijinių kanalų sistema su uždariaisiais kontūrais paskirsto esančias užterštame dujų sraute kietąsias daleles pagal masę į tris grupes. Kietosios dalelės, kurių masė yra mažesnė už tam tikrą kritinę vertę, yra išnešamos kartu su išvalytuoju dujų srautu. Kietosios dalelės bei didesnę masę už tam tikras reikšmes turintys aglomeratai yra grąžinami į užteršto srauto lauką arba tiesiogiai nusodinami ciklono bunkeryje, patenkant pro segmentinius plyšius, esančius išoriniuose ciklono kanaluose. Kietosios dalelės bei aglomeratai su tarpinėmis masių vertėmis pasiskirsto orbitose bei cirkuliuoja uždariais kontūrais. Uždaras kontūras yra sudaromas gretimų kanalų pora, taip pat užteršto dujų srauto lauku arba prijungtų prie ciklono surinkimo bunkeriu (1.1 pav.).

Tokios konstrukcijos šešiakanalis ciklonas gali išvalyti oro srautą nuo SDKD, kurių medianinis skersmuo siekia 5–6 μm, pasiekiant valymo efektyvumą virš

80 %. Tokie įrenginiai turi trūkumą, kuris apriboja jų naudojimą – gana stambūs gabaritai.



1.1 pav. Kanalų sistema su uždariaisiais kontūrais: R1–R7 – kreivalinių paviršių, sudarančių uždarus kontūrus, spinduliai (Серебрянский, 2009)

Fig. 1.1. Channel system with sealed circuits:

R1–R7 – radius of curved surfaces formed sealed circuits (Серебрянский, 2009)

Taip, pavyzdžiui, šešiakanalis išcentrinis filtras, kurio valomo oro srautas siekia iki 10 000 m³, turi būti 2,6 m skersmens ir 3,5 m aukščio (nevertinant kietųjų dalelių surinkimo bunkerio). Tokios konstrukcijos ciklonas yra įrengtas ir efektyviai veikia Moldavijos metalurgijos gamykloje anglies apdorojimo technologinėje linijoje po būgninio džiovintuvo ir geležies–nikelio gamykloje orui nuo grafito apdorojimo staklių valyti. Ciklonas su įrengtais keturiais kanalais yra įrengtas plieno lydymo ceche anglies miltų skaldymo linijoje. Pastarajame ciklone kietųjų dalelių koncentracijos siekė 154 g/m³, po valymo koncentracija buvo sumažinta iki 2,6 g/m³, tai atitiko 92 % valymo efektyvumą. Be to, daugiakanalis ciklonas gali būti taikomas įvairių statybinių medžiagų SDKD, pavyzdžiui, cemento, klinkerio ir kt. šalinimui iš dujų.

Ciklonas su uždariaisiais kontūrais išbandytas Moldovos cemento gamykloje. Dujų srautas dūmsiurbui buvo tiekiamas iš autoklavo krosnies per elektrostatinį filtrą ir cikloną. Dujų srauto debitas siekė 107 000 m³/val., ciklone sugaudomų kietųjų dalelių vidutinis skersmuo buvo 1 μm. Kietųjų dalelių masės srautas po elektrostatinio filtro buvo lygus 14,4 kg/val, po ciklono – 4,3 kg/val.

1.3.1. Ciklonų konstrukcijos sukurtos JAV bei Vakarų Europos ir Azijos šalyse

Ciklono tipo dujų (oro) valymo įrenginiai Šiaurės Amerikoje, Vakarų Europoje dažniausiai yra taikomi kaip pirminio valymo įrenginiai. Yra teikiamos

naujos patentinės paraiškos, tobulinant ciklono konstrukciją – vidinių elementų montavimui, sūkuriinio srauto sudarymui, dujų (oro) srauto įtekėjimo bei sausų ir drėgnų kietųjų dalelių sulaikymui.

JAV patentinėje bazėje pateiktame Heumann'o (2013) išradime buvo patobulinta ciklono konstrukcijos vidinė geometrija. Šiame išradime norint padidinti SDKD šalinimo efektyvumą yra pakeista ciklono separatoriaus vidinė konstrukcija. Tokiu būdu yra galimas nesudėtingas ir nebrangus kietųjų dalelių šalinimas iš dujų srauto (1.2 pav.). Ciklone yra įrengiamas mažiausiai vienas tangentinis dujų srauto įtekėjimas 2, kuriuo užterštas SDKD dujų srautas patenka į separavimo kamerą 3. SDKD yra išnešamos prie periferinės sienelės 4 ir veikiamos svorio jėgos yra nusodinamos ciklono dugne 5, išvalytas dujų srautas pašalinamas pro centrinį vamzdį 6. Daugiapakopis dujų srauto tiekimas leidžia paskirstyti dulkėto dujų srauto separavimą pakopomis bei išlaikyti tinkamą vidutinį greitį kanaluose. Ties įtekėjimais 2 susidaro papildomas dujų atskyrimas nuo esančių SDKD. Šis įrenginys gali būti naudojamas didelio užterštumo, bet nedidelio drėgnio dujų srautui valyti, o efektyvumas, atskiriant 10–15 μm kietąsias daleles, siekia iki 85 % (1.2 pav.).

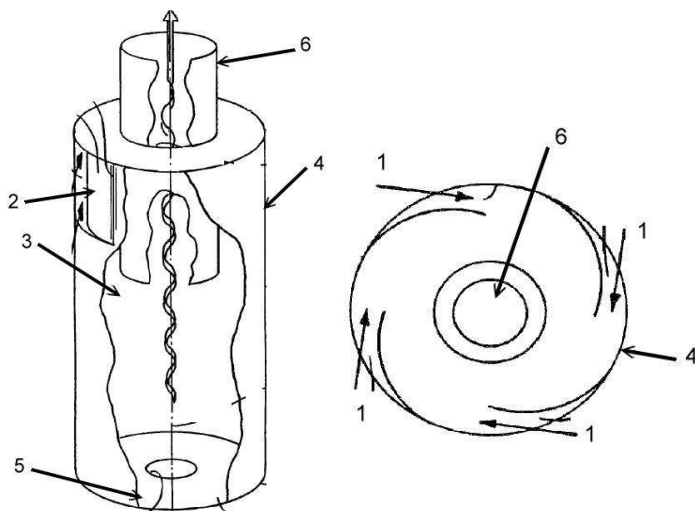
JAV mokslininkų sukurto įrenginio (Zenas, Harte & Walsh, 1961) veikimas pagrįstas judančio oro srauto ir kietųjų dalelių, esančių jame, šalinimu (1.3 pav.). Užterštas SDKD oro srautas įteka pro vamzdį 1, patenka į kanalą 2, kur kompresoriumi 4 ir perforuotu vamzdžiu 3 yra sudaromas sūkurys. Apatinė ašinė sparnuotė 6 atskiria esančias didesnes kietąsias daleles iš srauto, kurios pašalinamos iš įrenginio. Pro piltuvėlį 8 sraiginiu transporteriu 9 gali būti tiekiamos prieš tai iki 20 μm skersmens susmulkintos papildomos žaliavos.

Į uždara išorinį kanalą tiekiamos užterštos dujos, o atskiru vamzdžiu – švarus oras, kuris papildoma bendrą dujų srauto kiekį, o tuo pačiu sumažina SDKD koncentraciją. Toks praskiedimas reguliuojamas, keičiant įtekėjimo vamzdžio plotį rite 18. Kanale įrengti pakreipti kampais elementai 19 kietųjų dalelių judėjimo kryptį pakeisti. Kameros šiurkštus paviršius 17 ir didelio oro srauto greitis separatoriuje susmulkina ir nusodina kietąsias daleles, pasiekiant iki 85 % efektyvumą. Pro vidinį kanalą per ortakį 20 įrenginio ašyje pašalinamas išvalytas dujų srautas.

Nevisiškai išvalytas dujų srautas, praeinantis pro kanalų plyšius 10, valomas viršutiniame kanale, o dalis srauto su kietosiomis dalelėmis grąžinama atgal į pirmąjį kanalą, kur procesas kartojasi. Trečiajame viršutiniame kanale atskiriamos smulčiausios SDKD, kurių dydis siekia mažiau nei 5 μm , o efektyvumas iki 50 %. Kanalas sienele yra atskirtas nuo viršutinės ašinės sparnuotės kameros, į kurią oras patenka praeidamas pro aukšto efektyvumo filtrus 14, kurių efektyvumas siekia iki 95 %, išvalant orą nuo mažesnių nei 3 μm kietųjų dalelių. Išvalytas oras yra pašalinamas pro tangentinį ir išeinantį ortakį.

Norvegijos Trondheimo universiteto mokslininkai sukūrė ir užpatentavo cikloną, gebantį atskirti ir sulaikyti kietąsias daleles, skysčius ir dujas

(Christiansen et al., 2005). Ciklonas, apsaugots nuo aprasojimo, atskiria dujas, skysčius bei SDKD (1.4 pav.).

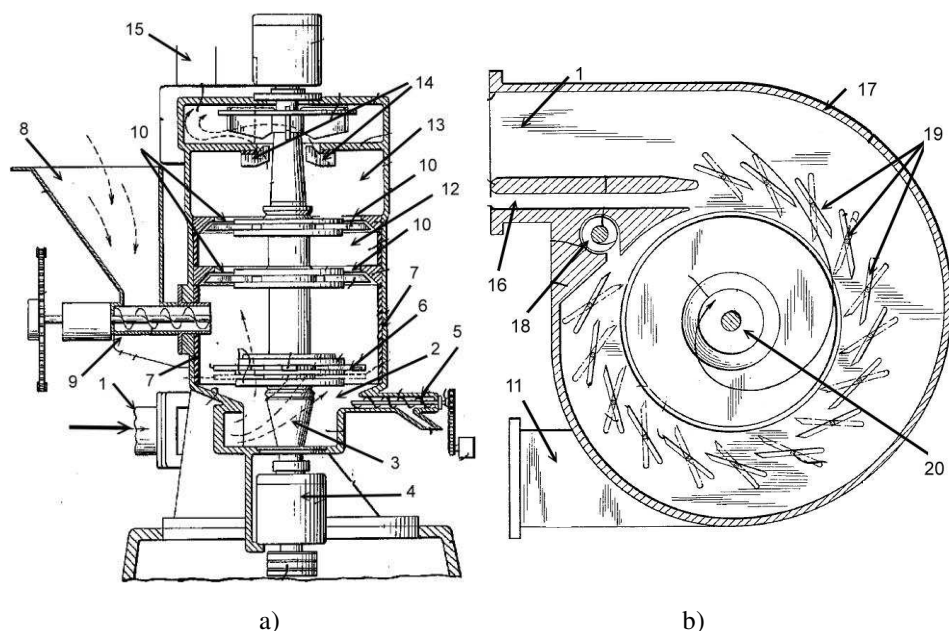


1.2 pav. Ciklono separatorius su daugiapakopiu dujų srauto tiekimu: 1 – dujų srauto įtekėjimas; 2 – tangentinis įtekėjimas; 3 – separavimo kamera; 4 – periferinė sienelė, 5 – įrenginio dugnas, 6 – centrinis vamzdis (Heumann, 2013)

Fig. 1.2. Cyclone separator with multi-gas stream inlet: 1 – gas flow inlet; 2 – tangential inlet; 3 – separation chamber; 4 – peripheral wall; 5 – bottom of the device; 6 – central tube (Heumann, 2013)

Užterštas SDKD dujų srautas yra įsiurbiamas į įrengtus ciklonus, kuriuose nusodinamos kietosios dalelės ir dujų sraute esanti drėgmė. Įtekėjus dujų srautui, jis atsimuša į įrengtą sukurinį elementą 12, todėl sraute esančios SDKD yra susukamos ir nusodinamos. Ašinėje ciklono zonoje gali būti lygiagrečiai įrengti tokio pat tipo ciklonai, kurie sujungiami bendru kolektoriumi 10.

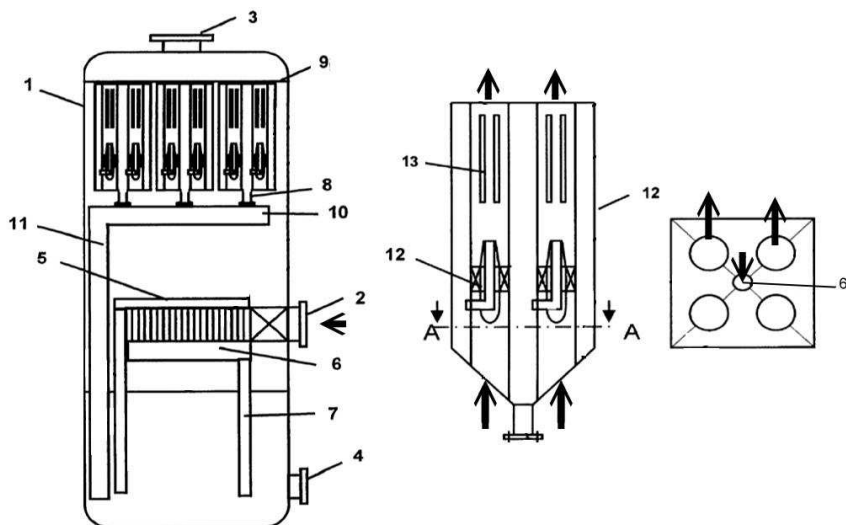
Kiekviename ciklono vamzdyje yra įrengti specialūs grioveliai, perforacijos ir mentės 13, kurios pirminiame ir antriniame separatoriuose atskiria kietąsias daleles bei esančios drėgmės lašelius ir nukreipia juos iš ciklono cilindrinės dalies. Proceso pabaigoje kondensatas 4 ir išvalytas dujų srautas 3 pašalinami pro atskirus vamzdžius. Tokio valymo įrenginio efektyvumas gali siekti iki 60 %, išvalant drėgną dujų srautą nuo kietųjų dalelių, mažesnių nei 15–20 μm. Priklausomai nuo kietųjų dalelių lipnumo, drenažo vamzdis 7 gali būti įrengiamas didesniu / mažesniu spinduliu nuo dujų įtekėjimo angų 2. Ciklono korpuse 1 yra įrengtos pakreiptos dugno plokštelės, taip pat pakreipti vidiniai talpos paviršiai, kurių kampas parenkamas toks, kad ant jų nesikaupytų kietosios dalelės (1.4 pav.).



1.3 pav. Trijų lygių dviejų kanalų miltų malimo–separavimo įrenginys: a) bendras vaizdas; b) separavimo kameros schema; 1, 11, 15, 20 – dujų srauto įtekėjimo, ištekėjimo, galutinio išmetimo ir ašinis ištekėjimo vamzdis; 2, 12, 13 – pirmasis, antrasis ir trečiasis kanalas; 3,5 – perforuotas ir SDKD pašalinimo vamzdis; 4 – kompresorius; 6 – apatinė ašinė sparnuotė; 7 – ciklono kanalo sienelė; 8 – žaliavų tiekimo piltuvėlis; 9 – sraigtinis transporteris; 10 – kanalų plyšiai; 14 – aukšto efektyvumo filtrai; 16 – švaraus oro tiekimo vamzdis; 17 – separavimo kameros šiurkštus paviršius; 18 – įtekėjimo pločio reguliavimo ritė; 19 – pakreipti kampais elementai (Zenas et al., 1961)

Fig. 1.3. Three-level two-channel flour milling device: a) a main view; b) separation chamber scheme; 1, 11, 15, 20 – gas flow inlet, the outlet, the final disposal and axial outflow tube; 2, 12, 13 – 1st, 2nd and 3rd channel; 3,5 – perforated and fine-dispersed PM removal pipe; 4 – compressor; 6 – lower axial impeller; 7 – cyclone channel's wall; 8 – raw material supply funnel; 9 – auger; 10 – channels' slits; 14 – high-efficiency filters; 16 – fresh air pipe; 17 – separation chamber rough surface; 18 – inlet width control coil; 19 – angled elements (Zenas et al., 1961)

Tokios konstrukcijos ciklonas gali būti naudojamas mažų kietųjų dalelių šalinimui iš drėgnų dulkių dujų. Tačiau įrengti apsauginiai vamzdžiai tuo atveju, jei sistema užsikemša dėl sulipusių SDKD, patvirtina svarbią tokių reiškinių sprendimo būtinybę, kuri šiame įrenginyje nėra pritaikyta. Galimybė valyti užterštą SDKD agresyviųjų dujų srautą ypač supaprastintų valymo įrenginių eksploataciją bei atpigintų jų aptarnavimą.



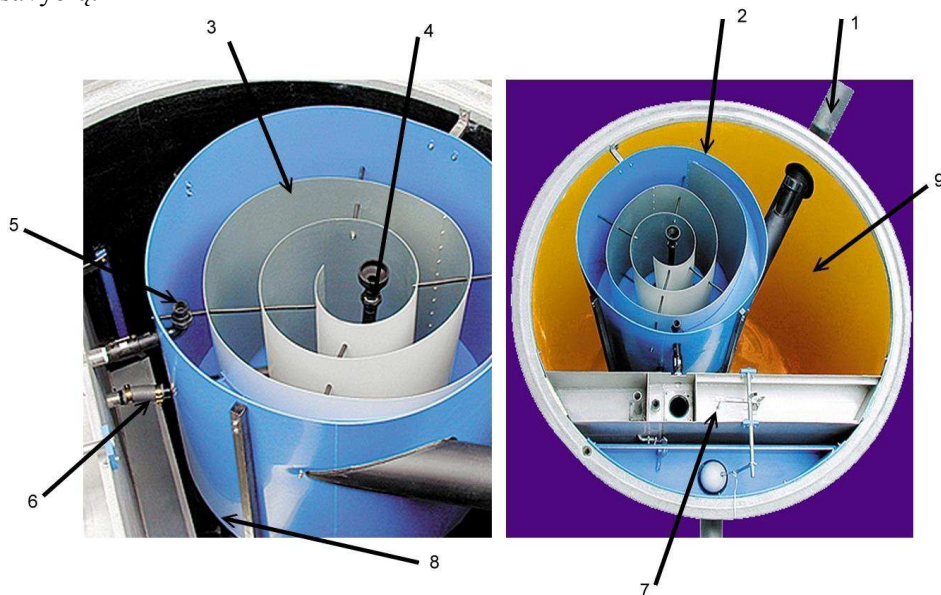
1.4 pav. Ašinis ciklonas su apsauga nuo aprasojimo: 1 – ciklono korpusas; 2 – pagrindinis įėjimo vamzdis; 3 – išmetimo vamzdis; 4 – kondensato pašalinimo vamzdis; 5 – drėgmės separatorius su mentėmis; 6 – drėgmės surinktuvas; 7, 8 – drenažo vamzdis ir anga; 9, 10 – ciklonai su bendru kolektoriumi; 11 – SDKD nuvedimo vamzdis; 12 – sukurinis elementas; 13 – kolektoriaus perforacijos ir grioveliai (Christiansen et al., 2005)

Fig. 1.4. Axial demisting cyclone: 1 – cyclone body; 2 – a main inlet tube; 3 – an exhaust pipe; 4 – condensate drainage pipe; 5 – moisture separator with the vanes; 6 – moisture collector; 7, 8 – drainage tube and hole; 9, 10 – cyclones with the single collector; 11 – fine-dispersed PM outlet tube; 12 – swirl element; 13 – perforations and grooves of collector (Christiansen et al., 2005)

Vokietijos mokslininkai sukūrė ciklono separatoriaus konstrukciją, kuri gali būti taikoma dujoms nuo SDKD valyti, taip pat kartu ir pakibusiems vandens garams užterštame sraute nusodinti. Įrenginio viduje yra įrengtas spiralės formos elementas, kuris sudaro kreivalinį kanalą, atskirtą nuo išorinės įrenginio erdvės (Bidos, 2019) (1.5 pav.).

Užterštas dujų srautas patenka į įrenginio separavimo kamerą 2. Ties spiralės formos elemento 3 briauna srautas pasidalija į atskirus srautus. Stambios kietosios dalelės, kurių skersmuo siekia virš $10\ \mu\text{m}$, yra nukreipiamos prie periferijos dėl jas veikiančių didesnių išcentrinių jėgų, vėliau SDKD yra išsiurbiamos apatinėje ir viršutinėje dalyje ir patenka į bunkerį 9. Išvalytas dujų srautas išeina pro vamzdį, įrengtą įrenginio ašyje. Smulkausios kietosios dalelės, kurios pasiekia ciklono ašį kartu su ašiniu sukuriu, yra ištraukiamos siurbliu pro ašinį vamzdį 4.

Siurblio 6 bloke 7 palaikomas tinkamas slėgis, kuris gali būti keičiamas, priklausomai nuo dujų srauto parametrų bei esančių sraute kietųjų dalelių prigimtės ir savybių.

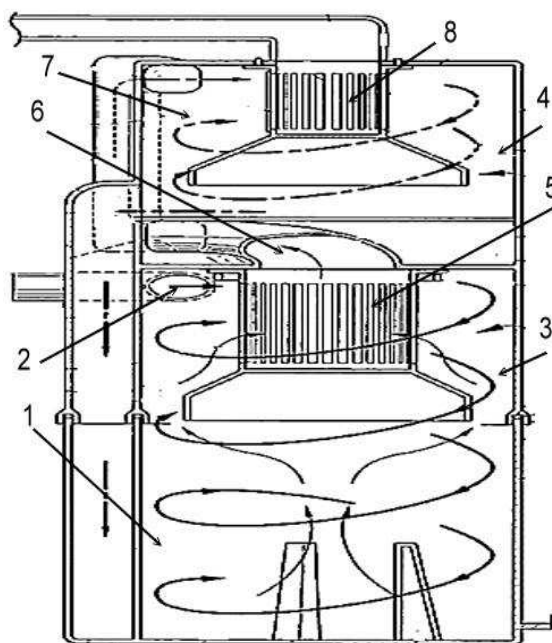


1.5 pav. Ciklonas su spiralės formos kreivalinijiniu elementu: 1 – įėjimo vamzdis; 2 – centrinė cilindrinė ciklono separavimo kamera; 3 – spiralės formos elementas; 4 – ašinis vamzdis; 5 – kietųjų dalelių pašalinimo vamzdis; 6, 7 – siurblys ir jo blokas; 8 – apatinė kameros dalis; 9 – kietųjų dalelių kaupimo bunkeris (Biodos, 2019)

Fig. 1.5. The cyclone with a spiral-shaped curved element: 1 – inlet tube; 2 – central cylindrical cyclone separation chamber; 3 – spiral-shaped element; 4 – axis tube; 5 – particulate removal tube; 6, 7 – pump and its unit; 8 – lower part of the chamber; 9 – particle accumulation hopper (Biodos, 2019)

Panaudojant šią valymo sistemą galima išvalyti dujų srautą nuo mažesnių nei 5 μm kietųjų dalelių, o bendras valymo efektyvumas gali siekti iki 90 %. Pripažįstama, kad didelis trūkumas yra tai, kad tokia konstrukcija, norint išvengti siurblių ir vidinės konstrukcijos užsikimšimo ir gedimo, gali būti naudojama tik sausoms ir neaukštos temperatūros dujoms valyti. Drėgnam dujų srautui valyti yra galimybė naudoti vandens siurblius, tačiau šiuo atveju surinkimo bunkeryje bus kaupiamos drėgnos SDKD (šlamos), kurios vėliau turi būti tinkamai apdorotos.

Vertinant daugiakanalių ciklonų paplitimą Azijos šalyse, galima labiausiai išskirti Kiniją ir Japoniją, kuriose šio tipo valymo įrenginiai yra plačiausiai tiriami, tobulinami ir taikomi. Kinijos mokslininkai (Oh, Han & Kim, 2009) sukūrė ir užpatentavo dviejų lygių cikloną su integruotais filtrais (1.6 pav.).

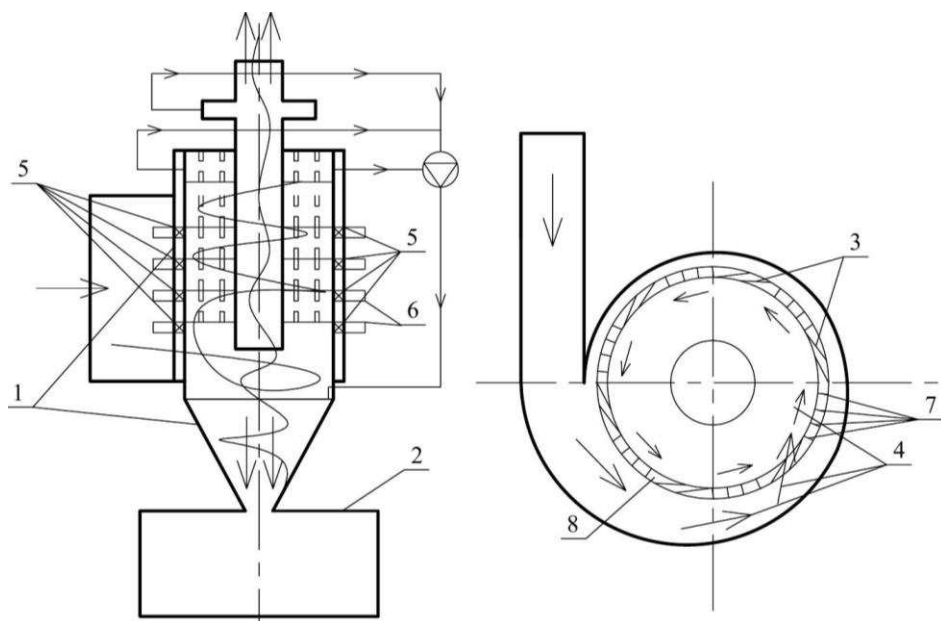


1.6 pav. Dviejų lygių ciklonas su integruotais kanalais ir filtru: 1 – apatinė pirmojo ciklono dalis; 2 – dulkteto oro įėjimas; 3, 4 – pirmasis ir antrasis ciklonas; 5 – integruotas filtras; 6 – pirmojo ciklono oro išėjimo anga; 7 – antrojo ciklono separavimo kamera; 8 – antrinis filtras (Oh et al., 2009)

Fig. 1.6. Two-level cyclone with integrated ducts and filter: 1 – bottom of 1st cyclone part; 2 – dusty air inlet; 3, 4 – 1st and 2nd cyclone; 5 – integrated filter; 6 – 1st cyclone outlet; 7 – 2nd cyclone separation chamber; 8 – postfilter (Oh et al., 2009)

Oras į įrenginį tiekiamas nuosekliai iš viršutinės ciklono dalies į apatinę dalį. Pasak kūrėjų, ciklonas gali būti taikomas SDKD šalinimui iš oro, kai koncentracija siekia nuo 100 mg/m^3 iki 10 g/m^3 , atskiriant kietąsias daleles, kurių skersmuo siekia mažiau nei $5 \mu\text{m}$, pasiekiant iki 97 % efektyvumą. Aukštas valymo įrenginio efektyvumas pasiekiamas taikant konstrukciją, sudarytą iš dviejų, trijų ir daugiau lygių, kuriuose SDKD nusodinimas kartojasi.

Ciklonas susideda iš dviejų ciklonų 3 ir 4, įrengtų viename korpuse. Dulktetas oras patenka į įėjimo angą 2, kuri prijungta prie apatinės 1 dviejų aukštų ciklono pakopos. Pirmoje pakopoje išvalytas oras pro integruotą filtrą 5 patenka į antroje pakopoje esančią separavimo kamerą 7. Antrame lygyje jau iš dalies išvalytas oras papildomai filtruojamas per filtrą 8 ir dėl slėgio gradiento išmetamas į aplinką (Oh et al., 2009).



1.7 pav. Daugikanalis ciklonas separatorius: 1 – cilindrinė ir kūginė dalis; 2 – SDKD bunkeris; 3 – plyšiai; 4 – dujų srauto mainai; 5, 6 – moduliniai mazgai ir jų sujungimas; 7 – mentės; 8 – cilindrinė sienelė (Mencher and Fichman, 1998)

Fig. 1.7. Multi-channel cyclone separator: 1 – cylindrical and conical part; 2 – fine-dispersed PM hopper; 3 – slits; 4 – gas flow exchanges; 5, 6 – modular units and their interconnection; 7 – blade; 8 – cylindrical wall (Mencher and Fichman, 1998)

Pagrindinis šio įrenginio trūkumas yra gana didelis aerodinaminis pasipriešinimas, kuris siekia 1800–2000 Pa, esant dviejų lygių ciklonui. Įrengti švarūs integruoti filtrai eksploataavimo pradžioje sukuria nedidelį slėgio kritimą, tačiau esant didelėms koncentracijoms, jų užsikimšimas ženkliai padidina pasipriešinimą, o tai visos sistemos prapūtimui reikalauja didesnio oro srauto debito. Didelio našumo užterštam orui valyti tokios konstrukcijos įrenginys bus didelių gabaritų. Panaudojamų integruotų filtrų tipas nėra universalus, jis turi būti parenkamas, priklausomai nuo valomo oro aplinkos sąlygų ir sugaudomų SDKD prigimtės ir savybių.

Izraelio patentų bazėje yra įregistruotas sukurtas ciklonas–separatorius, kuris gali būti taikomas SDKD, mažesnių nei 10 μm skersmens, šalinimui iš dujų arba vandens terpės, pasiekiant 75–85 % bendrą efektyvumą (Mencher and Fichman, 1998). Korpusas yra sudarytas iš cilindrinės ir kūginės dalies bei sujungtas su SDKD surinkimo bunkeriu (1.7 pav.).

Ciklono viduje yra suformuoti plyšiai 3, kurie nukreipia dalį srauto į vidinio cilindro dalį 1, taip tarp žiedinės erdvės ir išorinio cilindrinio elemento sudarant

dujų srauto mainus 4. Panaudojant modulinius mazgus 5, vienas elementas gali būti surinktas kartu su kitu 6, užkėlus vieną virš kito. Sūkurinį judėjimą suformuoja mentės 7, įtaisytos cilindrinėje sienelėje 8, o kiaurymės – laisvame plote tarp gretimų kreipiančiųjų (1.7 pav.) (Mencher and Fichman, 1998).

Kaip matyti iš pateiktų pavyzdžių, oro valymas, naudojant ciklono tipo valymo įrenginius, išlieka aktualus, todėl natūralu, kad yra tobulinamos pačių ciklonų konstrukcijos. Siekiant maksimalaus oro valymo efektyvumo ir toliau reikia ieškoti naujų būdų, gerinančių ciklono tipo oro valymo įrenginių konstrukcijos darbą. Šiame ciklone separavimo kamera įrengta be pertvaros, kuri atskirtų separavimo kamerą nuo bunkerio, todėl mažo tankio (iki 1000 kg/m^3) kietosios dalelės gali būti išnešamos kartu su oro srautu ir grąžinamos į cikloną.

Šio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas siekia 1500–1800 Pa, todėl yra būtina papildoma įranga (ventiliatorius ir pan.), kuri reikalauja nemažų energijos sanaudų.

1.3.2. Daugiakanalių ciklonų konstrukcijos sukurtos Rytų Europos šalyse

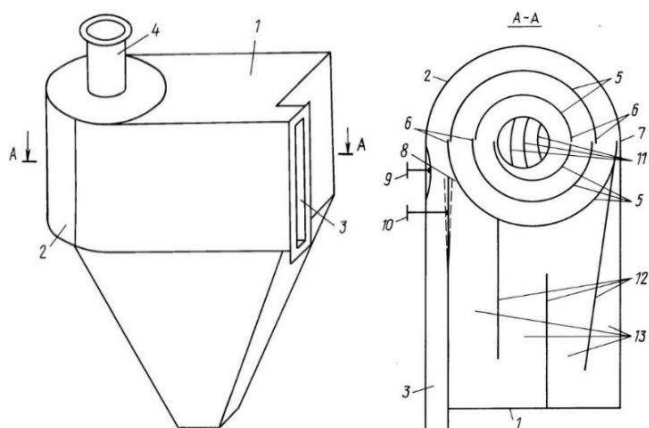
Aukšto efektyvumo inerciniame filtre – separatoriuje, sukurtame Sankt Peterburgo valstybiniame politechnikos universitete (SPbVPU) profesoriaus A. V. Tananaevo (patentas RU – 2080939), valymas vyksta veikiant išcentrinei jėgai ir papildomai vykstant daugkartiniam kietųjų dalelių nusodinimui. Vienas pagrindinių prototipo trūkumų yra didelis aerodinaminis pasipriešinimas (Тананаев, 1995) (1.8 pav.).

Inercinis filtras separatorius gali būti pritaikytas užteršto kietosiomis dalelėmis dujų srauto sausajam valymui. Patento kūrėjas kaip taikymo sritį nurodė statybinių medžiagų gamybą (cemento, kalkių ir kt.), kalnakasybos, metalurgijos pramonę, energijos gamybos pramonę, panaudojant anglį, durpes, degius skalūnus, maisto ir kitą technologiją, susijusią su cirkuliuojančiais bei išmetamaisiais į atmosferą užterštais dujų srautais, o įrenginio valymo efektyvumas siekia iki 98 %.

Dėl filtruojančių sluoksnių, esančių pusžiedžių formos sekcijose 5, sugaudomos kietosios dalelės gali būti mažesnės nei $5 \text{ }\mu\text{m}$ skersmens. Tokio tipo įrenginiai pasižymi kompaktiškumu, o vieno įrenginio našumas siekia iki $75\,000 \text{ m}^3$.

Vienas iš daugiakanalių ciklonų yra sukurtas Odesos nacionalinio politechnikos universiteto mokslininko profesoriaus A. Burov'o. Daugiakanalis filtras – kietųjų dalelių gaudytuvas „Buran“ 6–100 yra pritaikytas Moldavijos metalurgijos gamybos linijoje. Minėtas įrenginys yra pritaikytas nominaliam $10\text{--}15\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ našumui, jo sudaromas pasipriešinimas siekia 300–650 Pa, o projektinis valymo efektyvumas – iki 90–95 %. Tyrimais nustatyta, kad lyginant su kitais kietųjų

dalelių gaudytuvais šiame įrenginyje nustatytas mažesnis abrazyvinis poveikis korpusui ir jame esantiems elementams.



1.8 pav. Inercinis filtras – separatorius: 1 – surinktuvas; 2 – spiralinis kanalas; 3 – tangentinis įtekėjimas; 4 – ištekėjimo anga; 5 – pusžiedžių formos sekcijos; 6 – tarpžiedžiai tarpai; 7 – ciklono korpusas; 8 – kanalo tarpų zona; 9 – sklendė; 10 – konfuzorius; 11 – deflektorius; 12 – pertvaros (Тананаев, 1995)

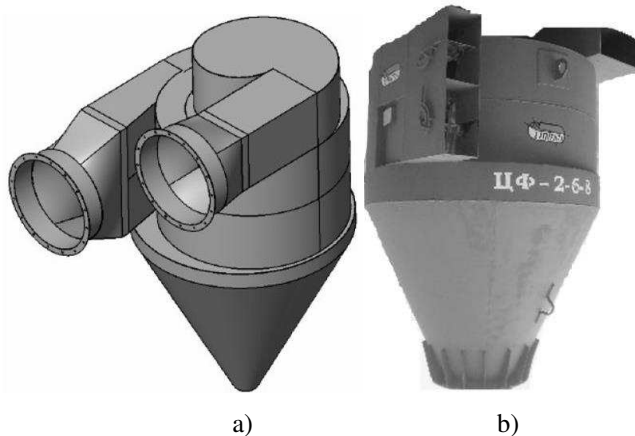
Fig. 1.8. Inercial filter–separator: 1 – collector; 2 – spiral channel; 3 – tangential inlet; 4 – outlet; 5 – half-rings shaped sections; 6 – spacing between zone of half-rings; 7 – cyclone body; 8 – channel spacing zone; 9 – valve; 10 – confuser; 11 – deflector; 12 – partitions (Тананаев, 1995)

Daugiakanalis filtras – kietųjų dalelių gaudytuvas yra sudarytas iš kanalų sistemos, bunkerio, įėjimo angos, išėjimo angos. Tačiau, kaip teigia žinomi tyrėjai (Серебрянский, 2004, 2009, 2011; Буров, Карамушко и Гамолич, 2012), išcentrinio filtro trūkumai – dideli matmenys ir masė, pvz., šešiakanalio išcentrinio filtro, kurio našumas 10 000 m³/h, cilindrinės dalies skersmuo – 2,6 m, o aukštis – 3,5 m (neįvertinus bunkerio dalies), efektyvumas – 97 % (1.9 pav.).

Norint sumažinti įrenginio matmenis, separavimo kameroje galima sukomponuoti dviejų lygių pusžiedžių sistemą. Zaparožės titano–magnio gamykloje dujų valymo sistemoje, šalinant kokso dulkes, cikloną SIOT Nr. 9 pakeitė suprojektuotas eksperimentinis išcentrinis dviejų lygių šešiakanalis CF 2–6–8 ciklonas, kurio skersmuo – 1,55 m, aukštis – 2,49 m (neįvertinus bunkerio dalies), našumas – 7200 m³/val., efektyvumas – 97,8 %, esant 7,3 g/m³ pradinei kietųjų dalelių koncentracijai (1.9 pav.).

Vienoje iš technologinių linijų buvo įrengtas mažesnio našumo išcentrinis filtras CF 2-6-06. Įrenginio našumas siekė 600 m³/val., efektyvumas – 98,9 %, esant 6,18 g/m³ kietųjų dalelių pradinei koncentracijai. Remiantis eksperimentinių

tyrimų rezultatais, buvo nustatyta, kad dviejų lygių ciklono išcentrinio filtro CF 2–6–8 ir CF 2–6–06 efektyvumas skiriasi nežymiai.



1.9 pav. Daugiakanaliai dviejų lygių išcentriniai filtrai: a) CF 2–6–06; b) CF 2–6–8 (Серебрянский и Новаковский, 2009)

Fig. 1.9. Two-level multi-channel centrifugal filters: a) CF 2–6–06; b) CF 2–6–8 (Серебрянский и Новаковский, 2009)

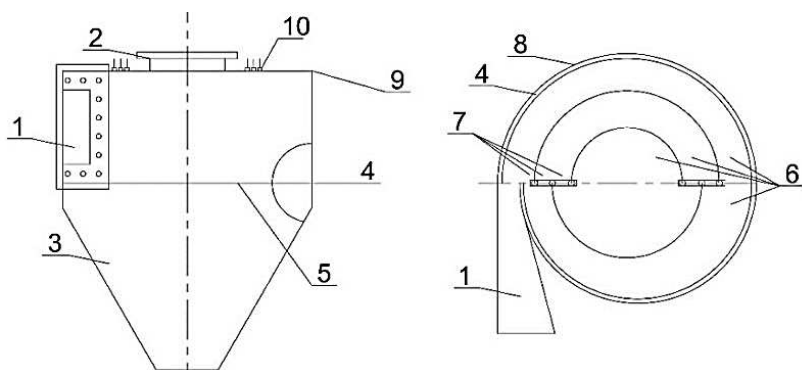
Moldovoje, Ribnicos mieste, cemento gamykloje buvo atlikti dviejų lygių šešiakanalio išcentrinio CF 2–6–06 filtro eksperimentiniai tyrimai, šalinant SDKD iš klinkerio aušinimo sistemos. Tyrimais nustatyta: išcentrinio filtro našumas – 200 m³/h, efektyvumas – 91 %, esant 480 Pa aerodinaminiam pasipriešinimui.

Išcentriniai filtrai gali būti naudojami kaip sujungtų tarpusavyje valymo įrenginių grupė, pavyzdžiui, kaip dviejų lygių šešiakanaliai išcentriniai filtrai (Серебрянский и Новаковский, 2009). Tokiu būdu įmanoma padidinti valomo dujų (oro) srauto kiekį (našumą), sujungiant ciklonus lygiagrečiai, arba didinti bendrą valomo oro kietųjų dalelių atskyrimo laipsnį, sujungiant ciklonus nuosekliai. Užterštų dujų (oro) srautų valymas, taikant ciklonus, sudarytus iš kanalų sistemos su uždariais kontūrais (grįžtamaisiais ryšiais), jau pagal atliktų pasaulio mokslininkų pirminius tyrimų rezultatus suteikia daugiau tokių įrenginių panaudojimo galimybių ateityje. Pvz., efektyvesnis valymas pasiekiamas, vykstant užteršto smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis dujų (oro) srauto daugkartiniam filtravimui.

Srautas, įtekėdamas į cikloną, patenka į pirmąjį kanalą ir juda tolimesniais kanalais įrenginio ašies link. Toks užterštas srautas, vadinamas tranzitiniu, yra filtruojamas pro kietųjų dalelių sluoksnius, cirkuliuojančius ciklono uždariaisiais

kontūrais. Dujų srauto valymas naujos kartos ciklonuose vyksta panaudojant filtravimo bei išcentrinių jėgų veikimo derinį (Серебрянский, 2011).

Ciklonų tyrimai, jų tobulinimas bei patentavimas aktyviai atliekami Lietuvoje. Vienas iš daugiakanalių ciklonų buvo sukurtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedros mokslininkų Baltrėno, Vaitiekūno ir Jakštonienės kartu su Kijevo politechnikos instituto technikos mokslo kandidatu Serebryansky'ų (1.10 pav.) (Baltrėnas, Vaitiekūnas, Sigal, Serebryansky ir Jakštonienė, 2011).



1.10 pav. Daugiakanalis ciklonas (spiralinis korpusas): 1 – įeinančio srauto anga; 2 – išeinančio srauto anga; 3 – bunkeris surinktuvas; 4 – žiedinis plyšys; 5 – separavimo kameros dugnas; 6 – ciklono kanalai; 7 – tarpžiediniai tarpai; 8 – separavimo kamera; 9 – separavimo kameros dangtis; 10 – pusžiedžių padėties fiksatoriai (Baltrėnas ir kt., 2011)

Fig. 1.10. Multi-channel cyclone (spiral casing): 1 – inlet flow hole; 2 – flow outlet; 3 – tank drain; 4 – annular slit; 5 – separation chamber bottom; 6 – cyclone's channels; 7 – spacing between zone of half-rings; 8 – separation chamber; 9 – separating lid; 10 – half-rings locking position (Baltrėnas ir kt., 2011)

Daugiakanalis horizontalus ciklonas yra sudarytas iš spiralės formos įtekėjimo 1, separavimo kameroje 8 esančių pusžiedžių, kurie yra išdėstyti taip, kad tarp gretimų pusžiedžių kraštų susidarytų plotis, ne didesnis kaip pusė kanalo pločio. Oras įteka tangentiškai pro įtekėjimo angą, prateka pro nuosekliai išdėstyto kreivalinijinių stačiakampinio skerspjūvio kanalų uždarytų kontūrų sistemą, o nusėdusios kietosios dalelės patenka į bunkerio surinktuvą 3, kurio aukštis turi būti ne mažesnis kaip 1,4 karto nuo kanalų, sujungtų su korpusu, aukščio. Pirmuosiuose dviejuose ciklono kanaluose išilgai periferinės sienelės yra padarytas žiedinis plyšys 4, kuris juos jungia su bunkeriu surinktuvu. Tarpai 7 tarp separavimo kameroje sumontuotų pusžiedžių lygūs tangentinio oro srauto įėjimo angos pločiui (1.10 pav.).

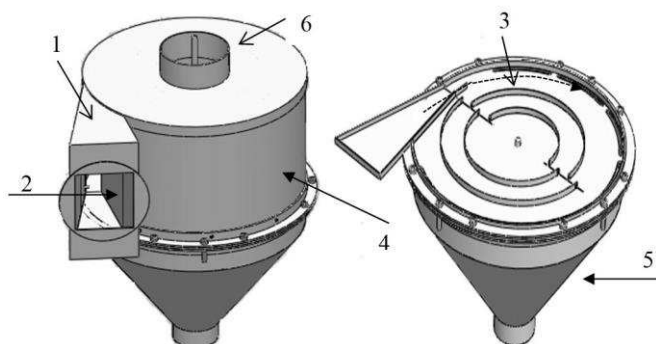
Šios konstrukcijos trūkumas – gana didelis jau atskirtų kietųjų dalelių patekimas iš bunkerio į pirmąjį kanalą, o tai sumažina valymo efektyvumą. Toks kietųjų dalelių judėjimas pasireiškia tuomet, kai dujų tekėjimas yra nuolat kintantis. Kitas trūkumas – efektyvumo rodiklio nepastovumas, kuris labai priklauso nuo kietųjų dalelių dispersiškumo ir jų savybių. Šio trūkumo galima iš dalies išvengti, panaudojant kreivalinijinių pusžiedžių reguliavimą.

Tokiu būdu įmanoma reguliuoti periferinio bei tranzitinio srautų santykį tarpžiedinėje aktyvaus filtravimo zonoje. Taip yra sudaroma sąlyga reguliuoti daugiakanalio ciklono vidinę geometriją pagal užterštame sraute esančių kietųjų dalelių ypatumus, pasiekiant optimalų variantą (Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014a; Vaitiekūnas, Petraitis & Chlebnikovas, 2014b; Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014c). Yra atliekamas tikslus ne tik uždarytų kontūrų suderinimas pagal kietąsias daleles, tačiau yra galimybė sureguliuoti sistemą, pasiekiant reikiamų aerodinaminių parametrų. Kreivalinijinių pusžiedžių padėtis separavimo kameroje gali būti reguliuojama, jas persutumiant išilgai jų ašies. Separavimo dangtyje įrengti laikikliai užfiksuoja norimą pusžiedžių padėtį (Baltrėnas, Vaitiekūnas, Jakštonienė & Konoverskytė, 2012).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedros daktarė I. Jakštonienė (2012) savo disertacijos darbe nagrinėjo daugiakanalį cikloną su reguliuojama pusžiedžių tarpų sistema. Šios konstrukcijos įrenginiui yra gautas Lietuvos Respublikos valstybinis patentas, kurio autoriai yra Aplinkos apsaugos katedros prof. P. Baltrėnas, prof. P. Vaitiekūnas, dr. I. Jakštonienė, Ukrainos Pramoninės ekologijos instituto direktorius A. Sigalas bei Tyrimų centro „Bakor“ vadovas D. Serebryanskyy'as. Cilindrinis daugiakanalis ciklonas yra skirtas orui (dujoms) valyti, išskiriant iš jų SDKD. Pasak autorių šis įrenginys gali būti naudojamas medienos pelenams ir cemento klinkeriui iš užterštų gamybinių emisijų šalinti (Baltrėnas et al., 2011; Jakštonienė, Serebryanskyy & Vaitiekūnas, 2011).

Daugiakanalio ciklono su reguliuojamaisiais tarpais bei plyšiais separavimo kameroje kietosioms dalelėms pasišalinti konstrukcija padidina SDKD šalinimo efektyvumą (1.11 pav.). Aukštas išvalymo laipsnis pasiekiamas tada, kai kietosios dalelės yra atskiriamos išcentrine jėga, filtravimo būdu bei reguliuojant pusžiedžių tarpų plotą (Baltrenas, Pranskevičius & Venslovas, 2015; Venckus, Venslovas & Pranskevičius, 2014).

Siekiant nukreipti oro srauto tekėjimą tik į pirmąjį kanalą, nuo konfuzoriaus 1 prie tangentinės oro srauto angos 2 yra įrengta pertvara. Pertvaros aukštis yra lygus kameros 4 aukščiui, o plotis – įtekėjimo angos pločiui. Tokia daugiakanalio ciklono konstrukcija skirtingos kilmės kietosioms dalelėms leidžia individualiai reguliuoti įrenginio sistemą maksimaliam kietųjų dalelių šalinimui iš oro srauto.



1.11 pav. Eksperimentinis cilindrinis daugiakanalis ciklonas: 1 – konfuzorius; 2 – oro srauto įtekėjimo anga į konfuzorių; 3 – oro srauto įtekėjimas į cikloną (į pirmąjį kanalą); 4 – separavimo kamera; 5 – bunkeris; 6 – oro srauto ištekėjimo anga / ortakis
(Jakštonienė et al., 2011)

Fig. 1.11. Experimental cylindrical multi-channel cyclone: 1 – confusor; 2 – air flow inlet into the confusor opening; 3 – air flow inlet into the cyclone (into the 1st channel); 4 – separation chamber; 5 – tank; 6 – air flow outlet opening/duct
(Jakštonienė et al., 2011)

Eksperimentiniais tyrimais buvo nustatyta, kad SDKD šalinimo iš oro srauto efektyvumas didėja, mažėjant pusžiedžių tarpų plotui. Dėl to cirkuliuojančiame sraute ciklono kanaluose padidėja dinaminis slėgis bei išcentrinė jėga. Didžioji dalis mažesnio aerodinaminio skersmens kietųjų dalelių, turinčių mažesnę svorio jėgą, yra stipriau veikiamos išcentrinės jėgos, jos patenka į mažesnio kreivumo kanalus ir pasišalina iš pirmojo ir antrojo kanalų į kūginį ciklono bunkerį 5. Be to, pusžiedžių tarpų plotį ir atstumą tarp pusžiedžių galima keisti, pasinaudojus ciklono dangtyje įrengta fiksuojamąja priemone.

Apibendrinant technologinę sukurtų ciklonų bazę, galima išskirti keletą tipų, kurie tarpusavyje turi charakteringų skirtumų. Šių tipų ciklonai bei jų taikymas, darbo parametrai ir trūkumai pateikti 1.2 lentelėje. Sukurtų valymo įrenginių esminė paskirtis – SDKD šalinimas iš dujų srauto.

Taikomi įvairūs nauji konstrukcijos elementai, kai kurie iš jų yra fiksuotos padėties ir paprastos geometrijos, kiti – judantys elektriniai įtaisai. Daugumos valymo efektyvumas siekia virš 85 %, o atskiriamų kietųjų dalelių skersmuo – mažesnis nei 15 μm.

Tačiau išlieka šie pagrindiniai trūkumai: ribotas taikymas aukštos temperatūros ir didelio drėgnio dulkėtų dujų srautui valyti, didelis aerodinaminis pasipriešinimas, reikalaujantis didelių energijos poreikių, taip pat konstrukcijos sudėtingumas ir eksploatavimo ekonomiškumas.

1.2 lentelė. Sukurtų ciklono konstrukcijų charakteristika (šaltinis: autorius)**Table 1.2.** Characteristics of designed cyclone (source: author)

Ciklono tipas, charakteringi konstrukcijos elementai	Paskirtis, efektyvumas, trūkumai
Ciklonas–separatorius su daugiapakopiu dujų srauto tiekimu (1.2 pav.)	didelio užterštumo dulkėtų dujų srauto valymas; ≤85 % (10–15 μm kietosios dalelės); Nedidelis valymo efektyvumas; Nedidelio drėgnio dujų srauto valymas.
Separatorius su ašine kreipiančiąja sparnuote ir pakreiptais elementais kanaluose (1.3 pav.)	Trijų pakopų valymas su smulkintuvu–separatoriumi: I pakopa ≤85 % (≤20 μm kietosios dalelės); II pakopa ≤50 % (≤5 μm SDKD); III pakopa ≤95 % (≤3 μm SDKD). Sudėtinga konstrukcija; Elektriniai judantys elementai; Didelis aerodinamis pasipriešinimas; Aukšto efektyvumo filtrų eksploatavimas; Ribotas taikymas įvairaus drėgnio ir temperatūros sąlygomis.
Ciklonas su perforacijomis, mentėmis ir grioveliais (1.4 pav.)	SDKD ir kondensuojančios drėgmės dujų sraute atskyrimas; ≤60 % (15–20 μm kietosios dalelės); Sistemos užsikimšimas esant didelio drėgnio dulkėtam dujų srautui; Sudėtinga drenažo vamzdžių sistema; Nedidelis valymo efektyvumas.
Spiralinis vienkanalis ciklonas–siurblys (1.5 pav.)	SDKD ir pakibusių vandens garų atskyrimui; ≤90 % (≤5 μm SDKD); Sausų ir neaukštos temperatūros dujų valymas; Elektrinių siurblių naudojimas; Sistemos užsikimšimas, esant didelio užterštumo dulkėtų dujų srautui; Taikant vandens siurblius, susidaro šlamas.
Daugialygis ciklonas su antriniu filtru (1.6 pav.)	SDKD šalinimas iš vidutinio ir didelio užterštumo oro srauto; ≤97 % (≤5 μm SDKD); Didelis 1800–2000 Pa aerodinaminis pasipriešinimas; Didelio valymo efektyvumo filtrų naudojimas; Sudėtinga konstrukcija ir dideli gabaritai.
Daugiakanalis ciklonas–separatorius su moduliniais mazgais (1.7 pav.)	SDKD atskyrimas iš dujų arba vandens terpės, našumas reguliuojamas taikant papildomus modulius; 75–85 % (≤10 μm SDKD); Didelis 1500–1800 Pa aerodinaminis pasipriešinimas; Nedidelis efektyvumas mažo tankio SDKD šalinimui.
Inercinis filtras–separatorius Daugiakanaliai daugialygiai ciklonai–filtrai (1.8 ir 1.9 pav.) Cilindrinis ir spiralinis daugiakanalis ciklonas (1.10 ir 1.11 pav.)	SDKD atskyrimas (daugiapakopis) iš dujų srauto, parenkant tinkamo našumo konstrukciją; ≤97–98 % (≤5 μm SDKD); Sistemos užsikimšimas, esant didelio drėgnio dulkėtam dujų srautui.

Daugiakanalių ciklonų, kaip inovacijos, diegimas pramonėje jau yra realizuotas bendrovės UAB „Lignineko“ (Metalistų g. 2, Kėdainiai, Lietuva) lignino paruošimo technologinėse linijose, kur buvo sprendžiama aplinkosauginė problema, susijusi su aplinkos oro tarša. Tam tikslui buvo parengtas daugiakanalio ciklono projektas, skirtas dujoms nuo lignino kietųjų dalelių valyti, esant agresyviųjų dujų srautui. Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) mokslininkai prof. habil. dr. P. Baltėnas ir dokt. A. Chlebnikovas pasiūlė inovaciją – daugiakanalį cikloną. Atsižvelgiant į atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatus buvo pasirinktas optimalus daugiakanalio ciklono konstrukcijos atvejis, kuriam buvo parengtas techninis projektas šios technologijos projektavimui ir gamybai. UAB „Lignineko“ atstovai pagamino ir sumontavo daugiakanalius ciklonus dviejose gamybos linijose. Tyrimai parodė, jog gamybos proceso metu įrengto valymo įrenginio efektyvumas siekė 92 %. Pasiiekti rezultatai nedaug skyrėsi nuo VGTU mokslininkų atliktų prototipo tyrimų rezultatų laboratorijoje: daugiakanalio ciklono efektyvumas nuo ypač smulkių 20 µm ir smulkesnių SDKD siekė net 95–96 %.

Šiuo metu modernizuotoje gamykloje sumontuotos 4 džiovinimo linijos, kuriose ligninas yra paruošiamas naudoti kaip biokuras. Daugiakanaliai ciklonai yra prijungti prie sistemos, kurią sudaro kuro tiekimo transporteris, pakura ir džiovyklos būgnas. Kiekvienoje iš keturių linijų yra atliekamas pirminis atskyrimas, panaudojant anksčiau eksploatuojamus tradicinius ciklonus, o antrinis valymo įrenginys – daugiakanalis ciklonas. Panaudojant kiekvieną iš džiovinimo linijų, per valandą yra išdžiovinama ir paruošiama 1,5 tonos lignino, o bendras įmonės našumas siekia 4300 t paruošto lignino biokuro per mėnesį. Pagrindinė problema – daugiakanalio ciklono užsikimšimas ir būtinas technologinės linijos stabdymas regeneravimui.

1.4. Daugiakanaliuose ciklonuose vykstančių procesų teorinių tyrimų apžvalga

Kietųjų dalelių šalinimas iš dujų srauto aspiracinėse sistemose yra atliekamas taikant ciklonus, rankovinius bei elektrostatinčius filtrus. Judančio srauto termodinaminiai ir hidrodinaminiai parametrai ir fizikinės cheminės kietųjų dalelių savybės nėra pastovios. Dėl šių veiksnių užteršto dujų srauto valymo įrenginiai dirba besikeičiančiais darbo režimais (Altmeyer et al., 2004; Song, Zhang, Zhu & Xiang, 2019).

Ciklonų veikimo teoriniai dėsningumai yra plačiai išnagrinėti užsienio mokslininkų (Hoffmann and Stein, 2008), kurie teigė, kad ciklono dalyje, kur SDKD atsiskiria nuo dujų srauto, susidaro žemėjantis besisukantis srautas. Teoriškai (idealiai fluidui) šis srautas turi judėti pagal pastovaus apskritiminio greičio

($V_{apskr.} = const$) dėsnį. Tačiau pasitaiko neatitiktį: iš pradžių greitis kanale didėja, o priartėjus prie ciklono ašies – staigiai sumažėja iki nulio.

Ciklono našumas yra apskaičiuojamas, remiantis jėgomis, kurias veikia SDKD svoriu a . Tuo metu išcentrinė jėga yra apskaičiuojama:

$$F_{išc.} = \frac{a \cdot V_{aps.i}^2}{g \cdot r_{jud.i}} b, \quad (1.1)$$

čia a – kietosios dalelės svoris, N; g – laisvo kritimo pagreitis, m/s²; $V_{aps.i}$ – apskritiminis kietosios dalelės greitis, rad/s; $r_{jud.i}$ – kietosios dalelės judėjimo spindulys, m; b – koeficientas, priklausantis nuo kietosios dalelės prigimties.

Aerodinaminis pasipriešinimas yra nustatomas:

$$W = \frac{a \cdot V_{aps.} \cdot b}{V_{dreifo}}, \quad (1.2)$$

čia V_{dreifo} – kietosios dalelės dreifo greitis, m/s.

Yra nustatomas ribinis dreifo greitis, esant $W = F_{išc.}$ ir $V_{dreifo} = V^*$ (čia V^* – ribinis dreifo greitis). SDKD, kurių dreifo greitis yra mažesnis nei ribinė vertė ($V_{dreifo} < V^*$), yra išnešamos, o kai dreifo greitis yra didesnis – sugaudomos.

Sudarant judėjimo lygtis, nagrinėjant atvejį, kai fluído srautas juda daugia-kanaliame ciklone, turi būti įvertintos greičio komponentės kiekvienos koordinatės ašies kryptimi (Care, Bonthoux & Fontaine 2014; Wasilewski and Brar, 2019). Didžiausias oro srauto greitis stačiakampės formos kanale pasiekiamas simetrijos ašyje (skerspjūvio centre). Kreivalinijiniame kanale lanko simetrijos ašimi laikomas išilginis simetrijos lankas, esantis kanalo pusaukštyje (Shi and Bayless, 2007). Tokio lanko ilgis yra geometrinis vidinio ir išorinio kreivalinijinių paviršių (periferinės sienelės, pusžiedžių) vidurkis, o šio lanko spindulys kiekviename iš ciklono kanalų nusako didžiausio apskritiminio greičio trajektoriją. Tokiu būdu didžiausio apskritiminio greičio trajektorijos spindulys, t. y. geometrinis vidinės ir išorinės kanalo sienelės spindulių vidurkis, išreiškiamas (Серебрянский, 2004):

$$R_{sien.0} = \sqrt{R_{sien.1} R_{sien.2}}, \quad (1.3)$$

čia $R_{sien.1}$ ir $R_{sien.2}$ – vidinės ir išorinės kanalo sienelės spindulys, m.

Tuo remiantis koordinatinių sistemoje apskritiminio greičio lygybė ciklono kanalo taške būtų lygi:

$$\frac{Q}{S_{kan.}} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{U_{aš.}}{r_{išk.}} \right) = F(V_{aps.}), \quad (1.4)$$

čia Q – pratekantis oro srauto debitas kanale, m^3/s ; $S_{kan.}$ – ciklono kanalo skerspjūvio plotas, m^2 ; $R_{kan.}$ – ciklono kanalo spindulys, m ; $U_{aš.}$ – ašinis dujų srauto greitis, m/s ; $r_{išk.}$ – spindulinė taško koordinatė.

Dujų srautui judant ciklono kanalais, jis dalijasi į periferinius (grįžtamuosius) ir tranzitinius (judančius į tolimesnį kanalą) srautus. Toks paskirstymas yra apibūdinamas kaip dujų srauto recirkuliacijos koeficientas:

$$Q_{rec.} = \frac{q}{Q_b}, \quad (1.5)$$

čia q – grįžtamojo dujų srauto debitas ciklone, m^3/s ; Q_b – bendras dujų srauto debitas kanale, m^3/s .

Tokiu atveju paskirstymas ciklono kanaluose gali būti aprašomas tokiomis lygtimis:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_b + (1 - \beta_2) \cdot Q_2; \\ Q_2 &= Q_1 + (1 - \beta_3) \cdot Q_3; \\ \beta_3 Q_3 &= Q_b + (1 - \beta_3) \cdot Q_2, \end{aligned} \quad (1.6)$$

čia Q_1, Q_2, Q_3 – dujų srauto debitas pirmajame, antrajame ir trečiajame kanale, m^3/s ; β_2, β_3 – tranzitinio dujų srauto dalis išėjime ties antruoju ir trečiuoju kanalu.

Sudaryta integralinė išraiška būtų lygi (Серебрянский, 2004):

$$\beta_i = \int_{R_i}^{R_i + \beta_i \Delta R_i} \vartheta_{\varphi i}(r) dr / \int_{R_i}^{R_{i+2}} \vartheta_{\varphi i}(r) dr, \quad (1.7)$$

čia $\vartheta_{\varphi i}(r)$ – apskritiminis greitis i -tojo kanalo išėjime, rad/s ; R_i ir R_{i+2} – išorinės ir vidinės i -tojo kanalo sienelių spinduliai, m ; ΔR_i – i -tojo kanalo plotis, m , $\Delta R_i = R_i - R_{i+2}$; β_i – tranzitinio srauto dalis ties išėjimu iš i -tojo kanalo.

Analizuojant susidarančius slėgio nuostolius daugiakanaliame ciklone yra vertinami nuostoliai vietinėje kliūtyje ir kelio nuostoliai, atsirandantys dėl veikiančių trinties jėgų (Calle, Contal, Thomas, Bemer & Leclerc, 2002; Jia, Wang, Yan, Song, Han, Chen & Wei, 2019). Pasipriešinimo koeficientu ζ yra išreiškiamas nuostolių vietinėje kliūtyje ($p_{v.kl.}$) ir srauto dinaminio slėgio (p_{din}) santykis:

$$\zeta = \frac{P_{v.kl.}}{P_{din.}}. \quad (1.8)$$

Siekiant nustatyti daugiakanaliame ciklone efektyviausiai sugaunamų kietųjų dalelių parametrus, vertinamas kietųjų dalelių skersmuo ir fiksuojamas jo didumas nurodant, kad bus surinkta 50 % nustatyto skersmens kietųjų dalelių. Fiksuotasis kietųjų dalelių skersmuo vadinamas kritiniu skersmeniu. Tada kietosios dalelės,

kurių skersmuo yra mažesnis už nustatytąją kritinio skersmens reikšmę, ciklone juda greičiu, artimu dujų srauto greičiui, t. y. laikoma, kad tokios kietosios dalelės juda kartu su srautu.

Norint cilindrinį daugiakanalį cikloną pritaikyti kitam oro debitui, reikia geometrinius ciklono parametrus (ciklono separavimo kameros skersmenį ir aukštį) apytiksliai perskaičiuoti pagal teorinę formulę (Jakštonienė ir Vaitiekūnas, 2010):

$$B_2 = B_1 \times \sqrt[4]{\frac{Q_{proj.}}{Q_{pat.}}}, \quad (1.9)$$

čia B_2 – projektuojamojo ciklono geometrinis parametras, m; B_1 – patobulinto cilindrinio daugiakanalio ciklono geometrinis parametras, m; $Q_{pat.}$ – patobulinto ciklono debitas, m³/s; $Q_{proj.}$ – projektuojamo ciklono debitas, m³/s.

Projektuojamojo ciklono korpuso skersmenį padalijus iš patobulinto ciklono skersmens, surandamas geometrinio panašumo koeficientas – 1,18, kuris taikomas projektuojamojo ciklono pusžiedžių spindulių suradimui ir išdėstymui ciklono separavimo kameroje. O projektuojamojo ciklono reguliuojamų pusžiedžių skerspjuvio plotį galima apskaičiuoti, įvertinus periferinio ir tranzitinio srauto santykius. Ši empirinė formulė gauta atlikus matematinę to paties tipo daugiakanalių ciklonų, valančių skirtingus užteršto kietosiomis dalelėmis oro debitus, analizę.

SDKD judėjimas dujų aplinkoje gali būti sukeliamas arba veikiant dinaminėms jėgoms, arba esant pačios aplinkos dujų srauto judėjimui. Tipiniu pavyzdžiu pirmuoju atveju gali būti laikomas SDKD pasiskirstymas nuo technologinių įrenginių, antruoju – SDKD judėjimas sukuriuose, konvekciniuose srautais ir kt. SDKD veikia gravitacinės jėgos, kurios, palyginti su dinaminėmis, yra nedidelės, todėl jų dažnai nepaisoma (Hong, Kim, Kwon & Park, 2012; Caliskan, Karagoz, Avci & Surmen, 2019; Roloff, Lukas, van Wachem & Thevenin, 2019).

Kietoji dalelė, kuri yra nusodinama veikiant gravitacinėms jėgoms, jei ji pakankamai didelė, pasiekia pastovų plevėnimo greitį gana greitai, pvz., 10 μm skersmens kietajai dalelei (tankis lygus 2700 kg/m³) šis greitis lygus 0,006 m/s. Šis greitis nėra reikšmingas, palyginti su dujų srauto greičiais valymo įrenginiuose (~10 m/s), taip pat atviroje darbo zonoje – 0,1 m/s. Kietosios dalelės, kurių dydis 30–40 μm, pasiekia 0,06–0,1 m/s greitį. Yra akivaizdu, kad tokio skersmens kietosios dalelės valymo įrenginyje juda veikiamos vien dėl dujų srauto (Yan, Liu & Chen, 2013).

Užterštam dujų srautui judant ciklono kanalais, kietosios dalelės yra atskiriamos ir nukreipiamos į segmentinius žiedinius plyšius, esančius separavimo kameros dugne (Boyko et al., 2016). Dujų srauto greičio patekimas į plyšius priklauso nuo dujų srauto pulsacijų intensyvumo ir kietųjų dalelių, praeinančių pro plyšius, dispersinės sudėties. Dujų srauto greičiai plyšio plokštumoje pasiskirsto

simetriškai dėl vienodo pagal dydį įtekančio į surinkimo bunkerį ir ištekančio iš jo dujų srauto debito. Tokiu būdu suminis įtekančio ir ištekančio dujų srauto greitis yra lygus nuliui (Серебрянский и Новаковский, 2009).

Kelias, kurį nueina dujų srautas, esant turbulentiniam tekėjimui, kol tampa vienalytis, yra tapatinamas su molekulių laisvuju lėkiu kinetinėje dujų teorijoje (Hu, Zhou, Zhang & Shi, 2005). Remiantis šia teorija, dujų greičio plyšio plokštumoje pasiskirstymo funkcija gali būti aprašoma tokia 1.10 lygtimi:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma_{d.s.g.}^2}\right), \quad (1.10)$$

čia U – dujų srauto greitis, m/s; $\sigma_{d.s.g.}$ – dujų srauto greičio vidutinė kvadratinė paklaida.

Esant užterštam kietosiomis dalelėmis srautui, kuris yra nukreiptas į surinkimo bunkerį, kietųjų dalelių skersmuo yra d ir plevėavimo greitis $U_{pl.}$, dujų greičio funkcija yra lygi (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a):

$$f_d(U_{d.s.g.}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{d.s.g.}} \frac{h_1}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2}} \exp\left(-\frac{(V - U_{pl.})^2}{2\sigma_{d.s.g.}^2}\right), \quad (1.11)$$

čia h_1 – ciklono bunkerio aukštis, m; h_2 – ciklono kanalo aukštis, m.

Kiti mokslininkai (Avci and Karagoz, 2003; Zhang, Chen & Yan, 2018), tyrinėję srauto ir geometrinių parametrų įtaką SDKD šalinimo efektyvumui ciklone, teigia, kad, norint pasiekti aukštą efektyvumą ciklone, reikalingas ilgas srauto buvimo ciklone laikas ir vidutinis srauto greitis 15 m/s.

1.5. Agresyviųjų dujų srauto charakteristika ir jo įtaka ciklono veikimo parametrams

Agresyviųjų dujų srautas gali susidaryti dėl atsirandančių ir / arba dirbtinių fizikinių, cheminių ar kt. faktorių visumos. Tokių faktorių daroma įtaka sukelia neigiamą poveikį technologijoms, kuriomis juda toks srautas, sukelia jų konstrukcijų pažeidimų, sutrikdo arba padaro negalimą ar pavojingą jų eksploataciją, nes pasikeičia medžiagų savybės ir vykstantys mechaniniai, fizikiniai, cheminiai ir kt. procesai. Objektų eksploatavimas tokiomis sąlygomis pasižymi jų sudarančių medžiagų savybių degradavimo ir / arba praradimo reiškiniais. Agresyviųjų dujų srauto poveikis yra vertinamas kartu su objektu, kuriam yra daroma neigiama įtaka, kadangi vienam objektui tokia aplinka gali būti agresyvi, kitam – neagresyvi.

Tokią, nepriklausomai nuo agregatinio būvio, aplinką sudarantys veiksniai turi tiesioginį kontaktą su aplinkos medžiagomis arba konstrukcijomis, su kuriomis sąveikaujant yra daroma neigiama įtaka, po kurios pastarosios negali būti funkcionaliai taikomos. Tokios aplinkos padariniai sukelia nepalankias sąlygas technologinių procesų vykdymui, gali sudaryti kenksmingą žmogui bei nepageidaujamą technologiniams įrenginiams aplinką, kelti pavojų dėl galimo sprogimo arba užsidegimo (Holbrow, 2013). Plačiausiai taikomose daugiakanaliuose ciklo-nuose kietųjų dalelių šalinimo iš dujų tolydumą nulemia kietųjų dalelių sąveikos su ribojančiais srautus paviršiais. Taip pat daro įtaką besiformuojantys kietųjų dalelių nuosėdų sluoksniai ant paviršių, kurie pakeičia srautų judėjimą ir neigiamai veikiantys kietųjų dalelių nusėdimo mechanizmą, o tai mažina kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą (Разва и Беляев, 2011). Dažnai yra susiduriama ne tik su oro aplinkoje vykstančiais procesais, bet ir įvairių dujų ar jų mišinių ar garų aplinkoje.

Lietuvos Respublikos normatyviniuose dokumentuose (Lietuvos Respublikos aplinkos..., 2013) nurodoma, kad, eksploatuojant naujus ar esamus biokuro katilus, leistini išmetamų teršalų kiekiai yra didesni, lyginant su kitu kietu, skystu ar dujinių kuru. Galima išskirti anglies monoksidą, kurio leidžiamos koncentracijos yra vienos iš didžiausių ir siekia iki 4000 mg/Nm^3 . Tokios koncentracijos turi įtakos dujų srauto charakteristikoms, dinamikos veiksniams bei SDKD šalinimo efektyvumui.

Kiti dažnai aptinkami dujų sraute teršalai – lakūs organiniai junginiai, pvz., acetonas, toluenas, butanolis, etanolis ir kt. Šios kategorijos teršalai yra ypač lengvai nešami dujų srauto, o technologinių procesų metu susidarančios koncentracijos yra ypač didelės. Pavyzdžiui, tekstilės pramonėje apdorojant odą bei jos dažymo metu išsiskiria toluenas, ksilenas, acetonas ir butilacetatas, kurių koncentracijos siekia 300 mg/m^3 . Didžiausios agresyviųjų dujų koncentracijos nustatomos dažymo baruose, kai koncentracija gali siekti virš 500 mg/m^3 . Didžiausia tarša nustatoma cechuose, kur naudojami lakūs tirpikliai, pvz., benzinas arba acetonas, arba jų mišiniai. Tokiu atveju atskirose darbo zonose yra galimos 2000 mg/Nm^3 ir didesnės pavienių cheminių junginių, kaip agresyviųjų dujų, koncentracijos. Be šių teršalų, yra būdingos amoniako, metalų anhidridų bei stiprių rūgščių garų emisijos, kurių koncentracijos siekia $20\text{--}50 \text{ mg/Nm}^3$. Visais šiais teršalais užterštas srautas kartu su kitais dujų srauto parametrais sukelia sinerginį poveikį, o tai turi įtakos ciklono veikimui bei jame vykstantiems dinamikos procesams (Kim, Gao, Yermakov, Elmashae, He, Reponen & Grinshpun, 2016).

Atlikta tyrimų, kurie pagrindžia, jog dujų mišinio sudėtis turi didelės įtakos adhezijai (Shi, Huang, Wang, Yuan & Fu, 2019). Vieni iš jų – kietųjų dalelių sąveika su paviršiumi amoniako ir sieros dioksido aplinkoje. Šie teršalai, o tuo

pačiu ir tokia aplinka yra dažnai pasitaikantis atvejis pramonės objektuose, kuriuose yra aptiktos SDKD emisijos. Adhezijos reikšmės nustatytos impulsiniu metodu, analizuojant 30 μm skersmens kietąsias daleles, atitraukiant jas nuo paviršiaus, esant įvairioms sąlygoms (Patat and Schmid, 1960). Nustatyta, kad esant oro–amoniako mišiniui 65 % drėgnio ir 18 °C temperatūros aplinkoje adhezija sumažėja tik 8 %. Esant toms pačioms aplinkos sąlygoms bei oro–sieros dioksido mišiniui, adhezija sumažėjo 39 %, o esant aplinkai be priemaišų – 42 %. Šios tendencijos išlieka ir esant vakuomo bei sauso oro sąlygoms, tačiau adhezijos sumažėjimas yra žymiai didesnis. Oro–amoniako aplinkoje, esant vakuumui, adhezijos jėga sudarė 43 %, o esant sausam orui – 64 % dydžio, lyginant su įprastomis sąlygomis. Ištyrus oro–sieros dioksido aplinką nustatyta, kad adhezijos jėgos sumažėjo atitinkamai 22 % ir 47 % vakuume ir sausame ore, palyginti su įprastomis sąlygomis. Labiausiai sumažėjo adhezijos jėga aplinkoje be priemaišų – atitinkamai 75 % ir 57 %, esant vakuumui ir sausam orui. Todėl galima teigti, kad amoniako įterpimas į aplinką žymiai padidino adheziją. Panašios priklausomybės išlieka ir tyrimuose, nagrinėjant stambesnes kietąsias daleles, t. y. 70 μm , tiriant adheziją su padengtais hidrofobiškais ir hidrofiliškais tirpalais stiklo paviršiais, esant įprastoms sąlygoms (kai temperatūra lygi 18 °C) (Patat and Schmid, 1960). Tyrėjai pateikė išvadą, kad amoniakas dėl vandenilio ryšio sugeba jungtis su kondensacine ir adsorbcine drėgme, kuri susidaro ant paviršiaus, ir tuo pačiu daryti įtaką adhezijai. Sieros anhidridas sausame ore praktiškai nedaro įtakos kietųjų dalelių adhezijai. Net esant pakankamai aukštai temperatūrai (50–80 °C) sauso oro–SO₂ aplinkoje lieka 84–96 % kietųjų dalelių, t. y. apytiksliai toks pat kiekis, kaip ir oro aplinkoje (Kim et al., 2016; Lars, Farshchi, Morgeneyer, Schwedes, Butt & Kappl, 2005).

Kietųjų dalelių nuosėdų sluoksnių formavimas yra analizuojamas kaip kietųjų dalelių tamprus atšokimas ir adhezija su paviršiumi, šių dviejų veiksnių jėgos, jų palyginimas (Kuuluvainen et al., 2016). Šių jėgų santykis yra tiesiogiai proporcingas kietųjų dalelių skersmeniui trečiame laipsnyje. Su adhezija siejamas sklaidos mechanizmas ypač svarbus mikrodalelei, nes jis gali būti kietųjų dalelių suliipimo priežastis (Jasevičius, Tomas & Kačianauskas, 2011; Sobolev, Melnikov & Tiutiunnyk, 2011; Winfield, Cross, Croft, Paddison & Craig, 2013). Dažniausiai, norint įvertinti adhezinio tampraus kontakto sklaidą, yra taikomas klampaus slopinimo mechanizmas. Tyrimas atskleidžia, kad ultrasmulkių kietųjų dalelių suliipimas įmanomas esant mažam pradiniam smūgio kampui, kai kietosios dalelės smūgio greitis normaline kryptimi yra daug mažesnis nei tangentinės krypties. Tyrimas parodė, kad mažiausiai tiriamai kietajai dalelei adhezijos įtaka yra stipriausia, todėl pradinis kritinis smūgio kampas – didžiausias. Smulkiausioms kietosioms dalelėms adhezijos įtaka buvo stipriausia, tačiau kietajai dalelei pradėjus atšokti ir didėjant pradinei kinetinei energijai, adhezijos įtaka stipriai sumažėja

(Jasevičius, Tomas, Kačianauskas & Zabulionis, 2014). Didesnio nei 10 μm skersmens kietųjų dalelių sedimentacijai daugiakanaliame ciklone būtini dideli oro srauto greičiai. Tačiau efektyviam ultrasmulkių kietųjų dalelių prilipimui prie sienelės paviršiaus reikalingi mažesni oro srauto greičiai. Dėl šios priežasties kietųjų dalelių prilipimas tikėtinas tose ciklono srityse, kur susidaro mažesni oro srauto greičiai, lyginant su pradiniu įėjimo į cikloną greičiu (Jasevičius, Baltrėnas, Kačianauskas & Grubliauskas, 2014; Xie, Dong & Li, 2016).

Tyrimais yra nustatyta, kad net stačiakampės formos kanale vyksta intensyvus kietųjų dalelių nusėdimas ant paviršiaus. Mažosios kietosios dalelės yra laikomos tokios, kurios yra nešamos kartu su srautu dėl turbulentinių pulsacijų (Bemer et al., 2013; Dejaguin, Miiller & Toporov, 1975; Vekteris, Striška, Mokšin & Ozarovskis, 2011a).

Pasienio sluoksnyje dėl vykstančios kietųjų dalelių turbulentinės migracijos srautas nukreiptas link ribojančio kanalą paviršiaus. Šis kietųjų dalelių turbulentinio pernešimo greitis apskaičiuojamas pagal 1.12 formulę:

$$\Delta V_{\text{urb.m.}} = -\frac{1}{2} U'(y) \frac{dU'}{dy} \tau, \quad (1.12)$$

čia U' – dujų srauto pulsacinio judėjimo amplitudė, m; τ – kietųjų dalelių relaksacijos laikas, s, $\tau = \frac{d_d^2}{18\mu_{d.s.}} \rho_{d.s.}$; y – atstumas iki sienelės, m; d_d – kietosios dalelės skersmuo, m; $\mu_{d.s.}$ – dujų srauto dinaminė klampa, Pa·s; $\rho_{d.s.}$ – dujų srauto tankis, kg/m³.

Maksimali šio greičio vertė yra pasiekama, kai $y_+ = 12,7$:

$$y_+ = -\frac{yu_x}{v}, \quad (1.13)$$

čia v – dujų srauto kinematinė klampa, m²/s.

Skaiciavimais yra nustatyta, kad inercinio judėjimo ilgis laminariniame posluoksnyje yra lygus $0,9 \cdot U' \cdot \tau$. Tokiu būdu realaus srauto atveju, srautui aptekant šiurkštų paviršių, ant pačios sienelės paviršiaus normalės greitis nelygus nuliui, kadangi laminarinio posluoksnio ant šiurkščių paviršių nelygumų nėra.

Kietųjų dalelių šalinimo ciklone efektyvumui turi įtakos dujų savybės – temperatūra, klampa, cheminė sudėtis. Dujų įtaka kietųjų dalelių šalinimui ciklone pasireiškia dvejopai – jos veikia dujų mišinio klampą; dujiniai junginiai taip pat gali keisti kietųjų dalelių savybes, sukeldami jų adheziją (arba autoheziją) (Avci and Karagoz, 2003; Sobolev et al., 2011; Van Wachem, B. G. M. & Almstedt, 2003; Wang, Xu, Chu & Yu, 2006).

Darant prielaidą, kad nėra vertinamos elektrinės ir kapiliarinės jėgos, tikrosios kietųjų dalelių formos ir kiti faktoriai, adhezijos jėgos dydį galima išreikšti priklausomybe:

$$F_{adh.} = \frac{h\omega}{16\pi z_0^2} d = \frac{h\omega}{8\pi z_0^2} r_d, \quad (1.14)$$

čia $h\omega$ – Planko konstanta, J; z_0 – atstumas tarp plokštumos ir kietosios dalelės, kuriam esant adhezijos jėga maksimali, m; r_d – kietosios dalelės spindulys, m.

Adhezijos jėgos, esant agresyviųjų dujų srautui mažėja proporcingai tarpo tarp kietosios dalelės ir paviršiaus dydžiui pakeltu antruoju laipsniu. Smulkios kietosios dalelės (mažesnės nei 50 μm) turi didesnį lietimosi paviršiaus plotą, lyginant su stambesnėmis kietosiomis dalelėmis, ir jų adhezijos jėgos dydis didesnis nei stambiųjų kietųjų dalelių (Beek, Rindt, Wijers & Steenhoven, 2006; Sobolev et al., 2011). Agresyviųjų dujų srautui judant daugiakanaliame ciklone, vandens garai kondensuojasi ant vidinių elementų paviršių, taigi susidaro vandens lašelių sluoksnis. Daugiakanaliame ciklone judančių kietųjų dalelių adhezija didėja, nes kartu su adhezijos jėgomis tarp dalelės ir paviršiaus kietosios dalelės lengviau prilimpa prie drėgnų elementų paviršių. Kietųjų dalelių nutraukimo galimybė yra svarbi oro srauto judėjimui ciklonuose. Adhezijos jėga garų prisotintame dujų sraute yra mažesnė negu sauso dujų srauto. Adhezijos jėgų mažėjimas ir agresyviųjų dujų srauto tankio didėjimas, lyginant su sausu dujų srautu, lemia tai, kad kietosios dalelės yra nutraukiamos sunkiau bei mažesniu nutraukimo greičiu. Esant papildomoms kliūtims, keičiasi srauto judėjimo trajektorija, atsiranda papildomi sukuriai, kinta Reinoldso rodiklis (Ozarovskis, 2012; Vekteris, Striška, Mokšin & Ozarovskis, 2011b; Vekteris, Striška, Mokšin, Ozarovskis & Zaremba, 2012; Jain and Petrucci, 2015; Xie, Dong, Li, Shang & Fu, 2017).

Kapiliarinių jėgų atsiradimą lemia kapiliarinė kondensacija, kuri vyksta tarpe tarp kietosios dalelės ir daugiakanalio ciklono paviršių agresyviųjų dujų srauto, t. y. vandens garų kondensacijos aplinkoje. Atsiradęs paviršiaus įtempis iš vienos pusės suspaudžia kietąją dalelę, iš kitos – sumažina veikiančią kietąją dalelę drėgno dujų srauto slėgį (Bateman, Belassein & Martin, 2014). Kadangi daugiakanalio ciklono paviršiai yra santykinai lygūs ir pagaminti iš metalo (nesugeriantys drėgmės), tai autohezijos jėga yra apskaičiuojama pagal 1.15 formulę:

$$\begin{aligned} F_{K.aut.} &= 2\pi\sigma_{pav.} z_0 \cos\theta; \\ F_{K.adh.} &= 4\pi\sigma_{pav.} z_0 \cos\theta, \end{aligned} \quad (1.15)$$

čia $\sigma_{pav.}$ – paviršiaus įtempis, N/m; z_0 – atstumas tarp kietosios dalelės ir paviršiaus, m; θ – drėkinimo kampas.

Remiantis pateiktomis išrašomis galima teigti, kad adhezija ir autohezija pasireiškia mažiausiai, kai kietosios dalelės juda statmenai paviršiui, esant mažiausiam lietimosi plotui.

Smulkiadispersių kietųjų dalelių iš agresyviųjų dujų srauto šalinimo metu daugiakanaliame cikle greičiai pasireiškia adhezija, kuri padidina paviršiaus šiurkštumą. Mažėjant paviršiaus glotnumui reikšmingai padidėja adhezijos jėga, kurios pokytis (%) yra lygus vidutinio nelygumo aukščiui $h_{nelyg.}$ ($\text{\AA} = 0,1 \text{ nm}$), padaugintam iš koeficiento, gauto eksperimentiniu būdu $k_{nelyg.} = 0,083$.

Agresyviųjų dujų srautas, kuris pasižymi aukšta temperatūra ir jame esančiu vandens garų kiekiu, esančiu dujinėje fazėje, pasižymi parcialiniu slėgiu, kuris nėra didesnis už įsotintų garų slėgį, esant tam tikroms dujų srauto sąlygoms (Sorrentino, Sabia, Joannon, Bozza & Ragucci, 2018). Atsirandantys dujų sraute vandens garai sumažina agresyviųjų dujų srauto tankį, kadangi vandens molinė masė yra mažesnė (18 g/mol) nei sauso dujų srauto (29 g/mol) (Wang, Yang, Zou, Cao, Ren & Li (2016)). Agresyviųjų dujų srautas gali būti laikomas kaip idealiųjų dujų mišinys, kurio kiekvieno iš komponentų tankis yra tinkamas reikiamo mišinio tankiui sudaryti (Schaik, Grooten, Wernaart & Geld, 2010; Shanthanu, Raghuram & Raghavan, 2013). Tokiu būdu yra įmanoma nustatyti tankio vertę, esant mažesnei nei 0,2 % paklaidai, kai temperatūra kinta nuo $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Agresyviųjų dujų–vandens garų (didelio drėgnio) ir aukštos temperatūros sraute pasireiškia vandens garų kondensacija ant SDKD paviršiaus (Zhu, Hua, Kang & Chen, 2017). Garų tamprumas yra didesnis ant išgaubto paviršiaus negu ant lygaus, pastarasis yra didesnis už tamprumą ant įgaubto paviršiaus (Wang et al., 2016). Todėl ant SDKD, kurių forma nėra taisyklinga, o tokios yra realios kietosios dalelės, kurių paviršius yra įgaubtas, garai kondensuojasi intensyviau nei ant išgaubto paviršiaus kietųjų dalelių (Boskovic et al., 2005). Jei garų slėgį ant lygaus skysčio paviršiaus pažymėsime kaip $P_{lyg.pav.}$, tai ant SDKD, kurių skersmuo yra d , paviršiaus garų slėgis gali būti apskaičiuotas pagal 1.16 lygtį:

$$\rho_{v.g.} = \frac{R_{v.g.} \cdot T_{v.g.}}{M} \ln \frac{P_{ig.pav.}}{P_{lyg.pav.}} = \frac{4\sigma_{pav.}}{d_d}, \quad (1.16)$$

čia $\rho_{v.g.}$ – vandens garų dujų sraute tankis, kg/m^3 ; $R_{v.g.}$ – vandens garų konstanta; $P_{is.}$ – įsotinimo slėgis ant kietosios dalelės paviršiaus, kg/cm^3 ; M – molekulinė masė, g/mol ; $P_{ig.pav.}$ – įsotinimo slėgis ant įgaubto paviršiaus, esant temperatūrai $T_{v.g.}$, kuri matuojama $^{\circ}\text{K}$, kg/cm^2 ; $P_{lyg.pav.}$ – įsotinimo slėgis ant lygaus paviršiaus; $\sigma_{pav.}$ – skysčio paviršiaus įtempis, kai temperatūra matuojama $^{\circ}\text{K}$, g/s^2 ; d_d – kietosios dalelės skersmuo, m .

Remiantis šia lygtimi galima teigti, kad, mažėjant SDKD skerspjūviui, ant jos paviršiaus didėja garų tankis, todėl skystis garuoja lengviau, o tai apsunkina vandens garų kondensacijos procesą.

1.6. Dujų srauto procesų ciklonuose modeliavimas

Sūkurinio srauto tyrimas įdomus techniniu ir moksliniu požiūriu dėl poveikio pernešimo procesams, susijusiems su recirkuliacijos srauto lauku. Viena smarkiai besisukančių srautų pritaikymo sričių yra ciklonai, kurie plačiai naudojami įvairiuose pramoniniuose procesuose.

Aerodinaminių parametrų tyrimuose, kurie atliekami laboratorijoje eksperimentiškai, nagrinėjamas vienfazis, dvifazis arba daugiafazis oro (dujų) srautas – oro bei priemaišų mišinys. Dažnai priimama pagal nutylėjimą santykinai švaraus oro prielaida, kai eksperimento metu papildomai neimituojamas užterštas oro srautas, kuris tiekiamas į įrenginį. Vienu iš skaitinio modeliavimo privalumų gali būti laikomi atskirų fazių judėjimo tyrimai (Chen, S. and Chen D.-R., 2016; Kim, H, Jeon, Song & Kim, K., 2014). Pastarieji galėtų pagerinti įrenginio eksploataciją, tačiau, nepaisant tariamo paprastumo, srautų dinamika sudėtinga, apimanti sūkurinį judėjimą bei atbulinio srauto žiedines zonas, o tiriant daugiafazį srautą, modelio sukūrimas tampa ypač sudėtingas (Montazeri, Blockena & Hensena, 2015; Wang, S., Li, Wang, R., Wang, X., Tian & Sun, 2019). Uždaro sūkurinio srauto teorijose iki šiol nebuvo išskirti daugelio srautų laukų ypatumai. Problema, susijusi su detalios srauto struktūros matematiniu modeliavimu, apima glaudžiai susijusių masės ir impulso tvermės netiesinių dalinių diferencialinių lygčių sprendimą ir neturi analizinio sprendinio (Zhu, Liao, Sui & Djilali, 2010). Be to, turbulencijos įvertinimas, pagrįstas izotropijos prielaida (pvz., turbulentinės klampos hipoteze), negali būti pritaikytas greitai besisukančių srautų atveju (Bernardo, Mori, Peres & Dionisio, 2006; Hoffmann and Stein, 2008).

Mokslininkas prof. habil. dr. P. Vaitiekūnas (2011) pateikė laiko atžvilgiu vidurkintas Navjė ir Stokso dujų fazės lygtis, susietas su anizotropiniu turbulencijos modeliu ir $k-\epsilon$ modeliu bei algebrinį įtempimų lygčių derinį. Po šio novatoriško darbo dar keliose studijose buvo modeliuojama turbulencija, siekiant geriau numatyti greitį ir slėgį, modifikuojant turbulencijos modelius. Visose šiose studijose nagrinėjama ašinė simetrija, leidžianti taikyti dviejų dimensijų modelį, kuriame daroma prielaida, kad kietoji fazė nesusiduria su dujų lauku.

Taikant PHOENICS programinį paketą, sprendžiama elipsinių lygčių sistema, apimanti judesio kiekio pernešimą trimis kryptimis, koncentracijas ir nenutrūkstamumą, Niutono klampos dėsnį, Furjė šilumos laidumo lygtį, Fiko difuzijos dėsnį.

PHOENICS programiniame pakete yra gaunami kietųjų dalelių sklaidos įvairiuose aukščiuose rodikliai bei nustatomas vertikalus teršalų pasiskirstymas. Esminis PHOENICS programos privalumas – galimybė rezultatus gauti pasirinktais laiko momentais. Be to, naudojant PHOENICS, nustatomos SDKD koncentracijos konkrečiu laiko momentu ir jos nėra didžiausios (Petraitis ir Vasarevičius, 2001).

Tobulėjant kompiuteriams ir skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) metodams, taikant skaitinius sprendimus galima apskaičiuoti sudėtingus srauto laukus. SFD metodika – padalyti nagrinėjamą sritį į daug kontrolinių tūrių ir pakeisti dalines diferencialines lygtis jų algebriniais ekvivalentais (Li and Zhou, 2015; Vaitiekūnas and Jakštonienė, 2010). Gaunama algebrinių lygčių aibė, kurią galima išspręsti taikant iteracinius metodus ir gauti kintamųjų – greičio komponentės ir slėgio – lauke pasiskirstymą, priklausantį nuo ribinių sąlygų, apibūdinančių konkretų uždavinį (Shi and Bayless, 2007; Wang et al., 2006; Zhao, Su & Zhang, 2006).

ANSYS programinis paketas yra skirtas pernašos procesams modeliuoti. Konkrečiai fluidų ir kietųjų dalelių judėjimui tirti yra taikoma keletas paprogramių, tarp kurių CFX, FLOTTRAN, Polyflow ir Fluent (Бойко, Абрамова, Серебрянский и Семенюк, 2015). Diskretizacijos procesas – baigtinių elementų metodas. Šiuo metodu yra atliekamas skaitinis tyrimas, vertinant kietųjų dalelių tarpusavio bei sąveikos su sienelę ryšius (Jakštonienė, 2012; Vaitiekūnas and Jakštonienė, 2010). Laminariniam ir klampios tekės analizei yra tinkamiausias Polyflow paprogramis, dažniausiai taikomas sudėtingosios reologijos – plastinės deformacijos uždaviniams spręsti. Erdvėje vykstantiems termodinaminiam procesams spręsti, analizuojant šildymo ir vėsinimo srautų judėjimą patalpose, naudojami ICEPak/AirPak paprogramiai. CFX ir Fluent paprogramiai yra vieni iš plačiausiai taikomų daugiafaziam fluidų tekėjimui modeliuoti. CFX paprogramis taiko baigtinių elementų sprendimo algoritmą, t. y. analizuoja parametrus ant kiekvienos ląstelės briaunos, tuo tarpu Fluent – apskaičiuoja parametrus kiekvienos tinklelio ląstelės centre, t. y. erdvinis, baigtinių tūrių sprendimo algoritmas. Tokiu būdu CFX modulio veikimas yra paremtas judesio lygčių sprendimu, labiau taikomu mechaniniams procesams tėkmėse tirti. Fluent programoje taikoma keletas sprendimų – tankiui, slėgiui bei perduodamai energijai kartu su srautu analizuoti. Todėl mokslininkų teigimu, šis paprogramis turi daugiausiai privalumų dujų srauto aerodinamikos ir kietųjų dalelių judėjimo procesams modeliuoti.

Taikant Fluent paprogramį, dažnai yra pasinaudojama automatinės parinktės funkcija skaičiavimo tinklelio sudarymui ir klampios modelio bei jo kintamųjų parinkimui. Be skaičiavimo tinklelio tinkamo detalumo bei modeliavimo rezultatų konvergavimo, labiausiai tikėtina, kad skaitinio modelio gauti rezultatai nekoreliuos su fiziniu modeliu. Neatlikus klampios modelio kintamųjų jautrumo

analizės, didelė tikimybė, kad maksimalus galimas tikslumas nebus pasiektas, o specifiniai reiškiniai modelyje bus nepastebėti.

J. Braz'as (2004) atliko pramoninio ciklono srauto SFD skaičiavimus. Dėl labai sudėtingų trijų dimensijų sukūrinių srautų ciklono viduje supratimas apie ciklone vykstantį kietųjų dalelių šalinimo iš dujų srauto procesą tebėra nepakankamas, nepaisant to, kad dujų ir kietųjų dalelių suspensijos srauto judėjimas ciklonuose jau seniai yra daugelio eksperimentinių, teorinių ir skaitinių tyrimų objektas (Hu, Firth, Vince & Lees, 2001; Gujun, Guogang, Xiaohu & Mingxian, 2008). Norint ištirti srauto struktūrą, eksperimentiniuose ciklonuose dažnai taikomi įvairūs matavimo metodai, tačiau šių metodų trūkumai trukdo susidaryti išsamų vaizdą apie srauto sudėtingumą (Cortés and Gil, 2007).

Dujų ir įvairaus skersmens kietųjų dalelių srautams modeliuoti naudojamos skirtingos modeliavimo programos. Reinoldso įtempiu turbulentinis (RIT) modelis pateikia tikslią sukūrimo srauto savybių, ašinio greičio, tangentinio greičio ir slėgio kritimo ciklono modelyje prognozę (Sommerfeld and Ho, 2003; Zhou, Wang, Chen, Guo & Wang, 2013). J. J. Derksen'as savo straipsnyje (2003) pristato Eulerio ir Lagranžo dvifazio srauto (dujų ir kietųjų dalelių) apibūdinimą. Eulerio dujų srauto apibūdinimu paremtas Lagranžo ir Eulerio srauto (LES) metodas (Elsayed, 2011). Kietųjų dalelių judėjimas, imituojantis dujų srauto laukus, buvo modeliuojamas, remiantis vienvpusio poveikio prielaida – dujų srautas veikia kietąsias daleles, tačiau kietosios dalelės dujų srautui poveikio neturi (Gong and Wang, 2004; Kavaliauskas and Vaitiekūnas, 2001).

J. J. Derksen'as su kolegomis (2006) vykdė trijų dimensijų (3D) nuo laiko priklausomą turbulentinio dujų srauto cikloniniame separatoriujė Eulerio ir Lagranžo modeliavimą, pagrįstą dvipusiu poveikiu. Kietųjų dalelių poveikis dujoms modeliuojamas kietųjų dalelių šaltinio kameroje metodu. B. Wang'as ir jo kolegoms (2006) dujų srautui ciklone modeliuoti taikė Reinoldso įtempių modelį. Kietųjų dalelių srautas modeliuojamas, taikant tikimybinį Lagranžo modelį. Modeliuojant gautas šalinimo efektyvumas ir kietųjų dalelių trajektorijos palygintos su eksperimentiniais duomenimis. Nustatyta kietųjų dalelių skersmens ir dujų greičio įtaka kietųjų dalelių šalinimo efektyvumui atitinka eksperimentų rezultatus (Gujun et al., 2008; Raoufi, Shams & Kanani, 2009). B. Zhao'as su kolegomis (2006) naudojo RIT modelį dujų srautui modeliuoti dviejų tipų ciklonuose: su standartiniu viengubu įleidimu ir spiraliniu dvigubu įleidimu (Kaya and Karagoz, 2008).

Atliekant skaitinį modeliavimą, įvertinant oro srauto turbulentiškumą, programos pakete naudojamos trimatės Reinoldso lygtys su standartiniu $k-\epsilon$, LES ir RIT modeliais, taikant baigtinių tūrių metodą. Skaitiškai sprendžiamos pernešimo procesų elipsinės trimatės lygtys turi tokią formą (Kavaliauskas and Vaitiekūnas, 2001; Vaitiekūnas, 2011):

$$\operatorname{div} \left(\underbrace{r_i \rho_i \vec{V}_i \Phi_i}_{\text{Konvekcija}} - \underbrace{r_i \Gamma_{\Phi_i} \operatorname{grad} \Phi_i}_{\text{Difuzija}} \right) = \underbrace{r_i S_{\Phi_i}}_{\text{Šaltinis}}, \quad (1.17)$$

čia r_i – i fazės tūrinė dalis, m^3 ; ρ_i – i fazės tankis, kg/m^3 ; Φ_i – i fazės priklausomas kintamasis ($\Phi = 1$ – tolydumo lygtis); \vec{V}_i – i fazės greičio vektorius; Γ_{Φ} – kintamojo Φ difuzijos koeficientas; S_{Φ} – Φ kintamojo srauto narys.

Lygčių sistemą (1.17) sudaro Navjė ir Stokso bei energijos pirmajam ir antrajam fazėms, sprendžiamoms baigtinių tūrių metodu, lygtys.

Skaičiuojant tokiais turbulentiškumo modeliais, kaip k – ε , LES ir RIT, kiekviename jų sprendžiamos kelių lygčių sistemos, kurių skaičius skirtinguose modeliuose priklauso nuo kintamojo Φ taip: LES modelyje Φ įgyja 1, $U_{imp.}$, $V_{imp.}$, $W_{imp.}$, k reikšmes, kur $U_{imp.}$, $V_{imp.}$, $W_{imp.}$ – impulso komponentės x , y ir z koordinatinių kryptimis, m/s ; k – ε modelyje – 1, u , v , w , k , ε ; RIT – 1, u , v , w , \bar{u}'^2 , \bar{v}'^2 , \bar{w}'^2 , $\bar{u}'v'$, $\bar{u}'w'$, $\bar{v}'w'$, $\bar{u}'v'w'$.

k – ε turbulentiškumo modelis remiasi izotropinio sukurių klamos koncepcija Reinoldso įtempių išraiškoms. Esant sudėtingiems srautams su svorio jėgomis ar sudėtingais įtempių laukais, ši prielaida per daug paprasta (Goncalves and Zeidan, 2017).

Vienas šiuo metu labiausiai inovatyvus tarp modeliavimo programinių paketų, kuris taikomas dujų srautų tekėjimo modeliavimui kanaluose, vamzdžiuose ir ortakių sistemose, taikant baigtinių elementų metodą, yra COMSOL Multiphysics. Šios programos galimybės neapsiriboja vien tik dujų srautų modeliais, jame taikoma šiam momentui vienintelė integruota modeliavimo aplinka, kuri suteikia galimybę taikyti daugiafizikinius modelius, kurie gali būti sprendžiami kartu. Bendruoju atveju COMSOL SFD modulis yra pritaikytas fluidų dinamikai modeliuoti kartu su kitais paprogramiais. Naudojant šį modelį galima modeliuoti suspaudžiamo tekėjimo simuliaciją ir spręsti ikigarsinio, garso ir viršgarsinio greičio uždavinius. Vartotojas gali pasirinkti, kokio pobūdžio spręsti uždavinį – laminarinio arba tubulentinio, taikant pilnas Navjė–Stokso lygtis (Li, Zhang, Bailey, Hoagg & Martin, 2017). Yra galimybė nagrinėti tekėjimus plonuose sluoksniuose, pavyzdžiui, plėvelėje ant konstrukcijos elementų paviršiaus. Kaip ir kituose modeliuose, yra galimybė spręsti kompleksinius uždavinius, tokius kaip neizoterminis fluidų tekėjimas, įvertinant laisvą arba priverstinę konvekciją, taip vertinant papildomai plūdumo sąlygas. Panaudojant statybinės mechanikos modelį yra vertinama fluידo ir konstrukcijos sąveika (*Fluid Structure Interaction*). Remiantis Lagranžo–Eulerio modeliu yra galimybė modeliuoti fluidų tekėjimą besisukančiuose įrenginiuose plokštumoje ir erdvėje. Nagrinėjant dujų ir esančių jose priemaišų tekėjimą, taikomi modeliai, panaudojant keletą fazių, parenkant jų nustatymus. Taikomi

Karro modeliai ir laipsnių dėsniai ne Niutoninio fluidų judėjimui modeliuoti (Cortés and Gil, 2007; Gujun et al., 2008; Wang et al., 2006).

Modeliuose yra įvertinti kintamieji, kurie kiekvienam nagrinėjamam atvejui leidžia apskaičiuoti Reinoldso, Prandtlio, Nuselto, Relėjaus ir Grafoso skaičius. Apskaičiuoti programos rezultatai yra lankstūs, įtraukiantys naujų pakeitimų į atliktus uždavinius (Lee and Huang, 2012; Utikar et al., 2010; Wilcox, 2008).

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Pramonės emisijas vis dažniau sudaro dūmų–garų srautai, užteršti 1–10 μm skersmens smulkiadispersėmis kietosiomis dalelėmis. Džiovinimo ir aušinimo, deginimo, mechaninio apdorojimo ir pan. technologinių procesų metų dujų srauto sudėtyje aptinkama lakiųjų junginių, pvz., acetono, tolueno, butanolio, etanolio ir neorganinių degimo produktų, tokių kaip: anglies monoksidas (CO), azoto oksidai (NO_x) ir kt., komponentų.

2. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad šiuo metu plačiai taikomi patobulintos konstrukcijos ciklonai ir daugiakanaliai ciklonai, kurie pasižymi didesniu valymo efektyvumu, ypač valant užterštą orą nuo smulkesnių nei 10 μm kietųjų dalelių. Tačiau juos eksploatuojant, esant agresyviųjų dujų srautui (aukštam drėgniui ir temperatūrai bei cheminiams junginiams esant dujų sraute), jie užsikemša, todėl regeneravimas praktiškai neįmanomas.

3. Moksliniuose publikacijose išanalizuota daugiakanalių ciklonų konstrukcinių patobulinimų reikšmė ir įtaka dujų judėjimo procesams daugiakanaliuose ciklonuose. Konstrukciniai patobulinimai – daugiapakopis užterštų dujų tiekimas į valymo įrenginį, vidinių elementų geometrijos pakeitimai gali būti taikomi įvairios prigimties kietosioms dalelėms šalinti, taip pat išvengti įrenginio aprasojimo ir pan.

4. Teorinių tyrimų apžvalgoje nustatyti dujų judėjimo ciklono kanalais dėsningumai veikiant išcentrinėms jėgoms ir aerodinaminiam pasipriešinimui. Tranzitinių ir periferinių srautų pasiskirstymas kiekviename iš kanalų apsprendžia vykstantį filtravimo procesą, kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą bei recirkuliaciją visame įrenginyje.

5. Literatūroje pateiktų daugiakanalio ciklono, esant ypatingoms sąlygoms, tyrimų nepavyko rasti. Todėl būtina nustatyti patobulinto daugiakanalio ciklono su konstrukciniais sprendimais valymo efektyvumo priklausomybes nuo agresyviųjų dujų srauto veiksnių (aukštos temperatūros, didelio drėgnio ir dujų sraute esančių cheminių junginių), taip pat kietųjų dalelių prigimties, koncentra-

cijos, aerodinaminių dujų srauto parametrų. Taip pat būtinas kietųjų dalelių adhezijos reiškinių daugiakanaliame ciklone įvertinimas, esant agresyviųjų dujų srautui.

6. Išanalizuoti matematiniai modeliai, kurie gali būti taikomi būdingiems daugiakanaliuose cikluose turbulentiniams srautams tirti, taikant skaičiuojamąją fluidų dinamiką. ANSYS programinio paketo galimybės, taikant baigtinių tūrių sprendimo algoritmą leidžia įvertinti skirtingų fizikinių savybių dvifazio srauto dinaminis parametrus, taikant turbulentinės klampos modelius bei jų modifikacijas.

Atlikus mokslinės literatūros analizę, nustatyta, kad yra klausimų, kurie sprendžiant daugiakanalių ciklonų taikymą, esant agresyviųjų dujų srautui, nėra išspręsti, todėl būtina:

1. Atlikti teorinius tyrimus, įvertinančius agresyviųjų dujų srauto tankį bei klampą, kietąją dalelę veikiančias jėgas bei dujų srauto greitį.

2. Realizuoti konstrukcinius daugiakanalio ciklono pakeitimus (antrinių dujų įtekėjimus ir išgaubtą separavimo kameros dugną, taip pat įrengti ne tik išorinių, bet ir vidinių kanalų persidengiančius segmentinius žiedinius plyšius).

3. Ištirti agresyviųjų dujų patobulintame daugiakanaliame ciklone srauto dinaminis parametrus bei skirtingų smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą. Nustatyti patobulinto daugiakanalio ciklono valymo efektyvumo priklausomybę nuo dujų srauto dinaminis parametrų (greičio, aerodinaminio pasipriešinimo, kietųjų dalelių skersmens, tankio ir koncentracijos).

4. Atlikti patobulintame daugiakanaliame ciklone vykstančių aerodinaminių bei kietųjų dalelių judėjimo agresyviųjų dujų sraute procesų modeliavimą, taikant skirtingus klampos modelius bei jų modifikacijas, esant skirtingam skaičiavimo tinkelio detalumui ir paviršiaus glotnumui. Gautuosius rezultatus palyginant su eksperimentiniais.

5. Sukurti patobulintą daugiakanalį cikloną, galintį pašalinti smulkiadisperses kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų srauto.

Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto dinaminių parametrų bei smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo teorinių ir eksperimentinių tyrimų metodikos

Patobulintas daugiakanalis ciklonas su antriniais dujų įtekėjimais yra skirtas užterštam srautui valyti, esant agresyviųjų dujų srautui. Jis pasižymi savita konstrukcija, kurią sudaro separavimo kamera, kurios viduje yra išdėstyti kreivalinijiniai konfigūruoti ketvirtadalio žiedo formos elementai su atitinkamais periferinių ir tranzitinių srautų pasiskirstymo kanaluose santykiais, pirminis ir antriniai dulkėtų dujų įtekėjimai ir ne tik išorinis ištininis žiedinis, bet ir vidiniai segmentiniai žiediniai kanalų persidengiantys plyšiai. Kreivalinijiniai elementai separavimo kameroje sudaro keturis išorinius kanalus ir tariamąjį vidinį centrinį kanalą, todėl ciklonas dar gali būti vadinamas keturkanaliu ciklonu.

Daugiakanalis ciklonas su antriniais dujų įtekėjimais buvo patobulintas, siekiant šį valymo įrenginį pritaikyti SDKD šalinimui iš agresyviųjų dujų srauto, pasižyminčio aukšta temperatūra, dideliu drėgniu ir cheminiais junginiais.

Eksperimentinių tyrimų tikslas – išanalizuoti agresyviųjų dujų srauto greičio pasiskirstymą patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose, įvertinti aerodinaminio pasipriešinimo kitimą, naudojant adheziją mažinančius konstrukcinius sprendimus, nustatyti skirtingos prigimties SDKD, turinčių skirtingų savybių, šalinimo efektyvumą, esant agresyviųjų dujų srautui ir, kintant dujų srauto dinaminiams parametrams (greičiui, patobulinto daugiakanalio ciklono sukurtam pasipriešinimui), ištirti SDKD adhezijos reiškinius bei jų mažinimo galimybes įrenginio konstrukcijos viduje. Eksperimentiniams tyrimams naudotos kietosios dalelės mažesnės nei 20 µm skersmens.

Valymo efektyvumo tyrimų tikslas – nustatyti skirtingos kilmės (bendrojo tankio) bendrąjį bei atskirų frakcijų ($KD_{2,5}$ ir KD_{10}) SDKD šalinimo efektyvumą agresyviųjų dujų sraute, priklausomai nuo dujų srauto dinaminų parametrų.

Daugiakanaliame ciklone dujų srautas, patekęs pro įtekėjimo angą, patenka į pirmąjį kanalą. Po to, pratekėjęs pro visus esamus kanalus ties ciklono ašimi, šis srautas juda mažesnio pasipriešinimo kryptimi nuo separavimo kameros pagrindo (dugno) link dujų srauto ištekėjimo angos – dujų srauto išeinančio ortakio (Baltrėnas and Chlebnikovas 2014).

Panaudojant kreivalinijinius ketvirtadalo žiedo formos elementus daugiakanaliame ciklone vietoje pusžiedžių, yra dvigubai padidinamas srautų pasiskirstymo zonų skaičius arba dvigubai sumažinamas kreivalinijinius kontūrus sudarančių elementų skaičius. Daugiakanalio ciklono separavimo kameroje kietosios dalelės yra atskiriamos ne tik dėl sukurinio srauto atsirandančia išcentrine jėga, bet ir dulkėto srauto filtravimu per kreivalinijinių ketvirtadalo žiedo formos elementų tarpus. Tuo pačiu pasireiškia papildomas filtravimo efektas, o tai lemia dulkėtų dujų valymo efektyvumo padidėjimą.

Skyriaus tematika paskelbta septyniolika autoriaus mokslinių straipsnių (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2018; Baltrėnas, Pranskevičius & Chlebnikovas, 2014; Baltrėnas, Vasarevičius, Kazlauskienė & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas and Baltrėnas, 2017a, 2017b; Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017; Danilenkaitė, Chlebnikovas & Vaitiekūnas, 2013; Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014; Vaitiekūnas, Petraitis & Chlebnikovas, 2014). Gauti autoriaus Europos ir LR patentai (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2019; Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2013, 2017).

2.1. Patobulinto daugiakanalio ciklono teorinių tyrimų, įvertinant agresyviųjų dujų srauto fizikinius parametrus, metodika

Esant agresyviųjų dujų srautui pasikeičia jo charakteristikos – slėgis, tankis ir veikiančios dujų srautą bei SDKD mechaninės jėgos, nes SDKD ir vidinių paviršių sąveikoje pasireiškia adhezija.

Šių tyrimų tikslas – teoriškai įvertinti patobulinto daugiakanalio ciklono darbo parametrų kitimą agresyviųjų dujų sraute, taip pat, remiantis charakteristikų sąryšiais, nustatyti ir palyginti dujų srauto aerodinaminių parametrų bei kietųjų dalelių veikiančių jėgų pokyčius.

Pirmiausiai nagrinėjant agresyviųjų dujų srautą buvo apskaičiuoti pagrindiniai šį srautą charakterizuojantys parametrai – sauso ir drėgno dujų srauto tankis, dinaminė ir kinematinė klampa, rasos taško vertė. Pokytis buvo vertinamas priimant nagrinėjamą aplinką kaip garų ir dujų srauto mišinį, šios aplinkos vyraujančią temperatūrą ir santykinį drėgnį. Teoriškai nustatytos didžiausios dujų srauto santykinio drėgno ir drėgno dujų srauto tankio priklausomybės nuo agresyviųjų dujų srauto temperatūros bei sudaryta matematinė išraiška agresyviųjų dujų srauto santykiniam drėgniui apskaičiuoti, priklausomai nuo agresyviųjų dujų srauto temperatūros.

Bendruoju atveju dujų srauto tankis apskaičiuojamas, taikant 2.1 išraišką, įvertinant sausų dujų srauto parcialinio slėgio pokytį, priimant esamą santykinį drėgnį ir temperatūrą. Autoriaus sudaryta matematinė išraiška yra:

$$\rho_{d.s.} = \frac{P_{s.d.s.}}{R_{s.d.s.} \cdot T_{d.s.}} + \frac{\varphi_{d.s.} \cdot 6,1078 \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot t}{234,175 + t}}}{R_{v.g.} \cdot T_{d.s.}}, \quad (2.1)$$

čia $\rho_{d.s.}$ – dujų srauto tankis, kg/m^3 ; $P_{s.d.s.}$ – sauso dujų srauto parcialinis slėgis, Pa; $R_{s.d.s.}$ – sauso dujų srauto konstanta; $T_{d.s.}$ – absoliuti dujų srauto temperatūra, K; $\varphi_{d.s.}$ – dujų srauto santykinis drėgnis, %; t – dujų srauto temperatūra, $^{\circ}\text{C}$; $R_{v.g.}$ – vandens garų konstanta.

Išanalizavus teorinių tyrimų rezultatus, išvesta specialiai pritaikyta matematinė išraiška agresyviųjų dujų srauto tankiui apskaičiuoti esant 20°C , 50°C , 100°C ir 200°C agresyviųjų dujų srauto temperatūrai.

Esant pasikeitusiam dujų srauto pobūdžiui, pasikeičia ir veikiančios kietąją dalelę jėgos judančiame dujų sraute. Buvo apskaičiuotos mechaninės jėgos – slėgio, išcentrinė–filtravimo, pasipriešinimo, gravitacijos ir adhezijos–filtravimo jėgos, kapiliarinės ir elektrinės jėgos, agresyviųjų dujų srauto Reinoldso skaičius, veikiančios skirtingo skersmens SDKD. Išanalizuota, kokios iš pastarųjų jėgų gali

turėti reikšmingą įtaką ir kaip ši įtaka patobulintame daugiakanaliame ciklone gali paveikti agresyviųjų dujų srauto judėjimą bei valymo procesą nuo kietųjų dalelių.

Taikant teorines matematinės išraiškas patobulinto daugiakanalio ciklono judančio dujų srauto greičiui apskaičiuoti yra vertinamas dinaminio slėgio pokytis bei dujų srauto tankio dydis. Tačiau, esant agresyviųjų dujų srautui, papildomai reikia įvertinti sauso bei drėgno dujų srauto slėgius ir vandens garų bei temperatūros įtaką dujų srauto klampai. Teoriniuose tyrimuose buvo taikyta sudaryta pilna matematinė išraiška (2.2), kuri yra sudėtinga.

Agresyviųjų dujų srauto greičiui turi įtakos santykinis drėgnis ir dujų srauto temperatūra. Pagal 2.3 išplėstą išraišką galima matyti, kad dujų srauto greitis tiesiogiai proporcingas dinaminiam slėgiui P_{dinH_2O} ir atvirkščiai proporcingas agresyviųjų dujų srauto tankiui g_t .

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot P_{dinH_2O}}{\left(\frac{P_{s.d.s.}}{R_{s.d.s.} \cdot T_{d.s.}} + \frac{6,112 \cdot e^{\left(\frac{17,67 \cdot t}{243,5+t} \right)} \cdot \varphi_{d.s.}}{R_{v.g.} \cdot T_{d.s.}} \right)}}, \quad (2.2)$$

čia U – dujų srauto greitis ciklone, m/s; g – laisvo kritimo pagreitis, m/s²; P_{dinH_2O} – dinaminis dujų srauto slėgis, mmH₂O; $P_{s.d.s.}$ – sauso dujų srauto parcialinis slėgis, Pa, lygus 101325 Pa; $R_{s.d.s.}$ – sauso dujų srauto konstanta; $T_{d.s.}$ – absoliuti dujų srauto temperatūra, K; $t_{d.s.}$ – dujų srauto temperatūra, °C; $\varphi_{d.s.}$ – dujų srauto santykinis drėgnis, %; $R_{v.g.}$ – vandens garų konstanta; ši išraiška gali būti taikoma, kai dujų srauto temperatūra $t_{d.s.} = 50$ °C, o santykinis drėgnis $\varphi_{d.s.} = 0-95$ %.

Pastarasis dydis g_t yra tiesiogiai proporcingas atmosferos slėgiui ir atvirkščiai proporcingas agresyviųjų dujų srauto temperatūrai. Teoriniuose tyrimuose daroma prielaida, kad atmosferos slėgis nekinta ir lygus atmosferos slėgiui.

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot g_t \cdot P_{dinH_2O}}{\rho_{d.s.n.s.} = 0,359 \cdot 1,292 \cdot \frac{P_{atm.}}{273 + t_{d.s.}}}}, \quad (2.3)$$

čia U – dujų srauto greitis ciklone, m/s; g – laisvo kritimo pagreitis, m/s²; P_{dinH_2O} – dinaminis dujų srauto slėgis, mm H₂O; $\rho_{d.s.n.s.}$ – dujų srauto tankis perskaičiuotas normaliosioms sąlygoms, kg/Nm³; $P_{atm.}$ – atmosferos slėgis, mmHg; $t_{d.s.}$ – dujų srauto temperatūra, °C.

Išvestos specialiai pritaikytos matematinės išraiškos agresyviųjų dujų srauto greičiui pirmojo patobulinto daugiakanalio ciklono kanalo pradžioje apskaičiuoti, priklausomai nuo agresyviųjų dujų srauto drėgno, ir atskirai nuo temperatūros.

Teorinis valymo efektyvumas, priklausomai nuo pusžiedžių skaičiaus daugiakanaliame cikle gali būti apskaičiuotas, norint nustatyti išcentrinio filtro SDKD išmetimo koeficiento priklausomybę nuo pusžiedžių skaičiaus (Jakštonienė, 2012; Буров и др., 2012). Apytiksliai šį parametą galima nustatyti pagal 2.4 formulę:

$$e = \frac{1}{1 + 2^{n-1}}, \quad (2.4)$$

čia n – pusžiedžių skaičius daugiakanaliame cikle (išcentriniam filtre); e – SDKD išmetimo koeficientas.

Tyrimai parodė, jog, didėjant pusžiedžių skaičiui, SDKD šalinimo efektyvumas iš dujų srauto didėja (Jakštonienė ir Vaitiekūnas 2009; Серебрянский и Новаковский, 2009).

Teoriniams tyrimams atlikti buvo taikomi realaus fizinio modelio – esamo patobulinto daugiakanalio ciklono vidutinis dujų srauto greitis kanaluose, vertinamas jo pokytis priklausomai nuo agresyviųjų dujų srauto pobūdžio (agresyvumo). Priimtas vidutinis kietųjų dalelių tankis lygus 1000 kg/m^3 . Taikomos formulės pritaikytos patobulinto daugiakanalio ciklono geometrijai, įvertinus esančio separavimo kameroje kanalų spindulį, priimtas kaip pavyzdinis pirmasis kanalas, kurio spindulys lygus $0,225 \text{ m}$. Vertinant mechanines jėgas, analizuojamos būdingų SDKD skersmenys, t. y. $1 \text{ }\mu\text{m}$, $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ ir $10 \text{ }\mu\text{m}$.

2.2. Agresyviųjų dujų srauto sudarymo metodika

Bendroje sistemoje su patobulintu daugiakanaliu ciklonu ir jo ortakių sistema yra naudojama papildoma įranga norint sudaryti agresyviųjų dujų srautą bei ištirti valymo įrenginio efektyvumą.

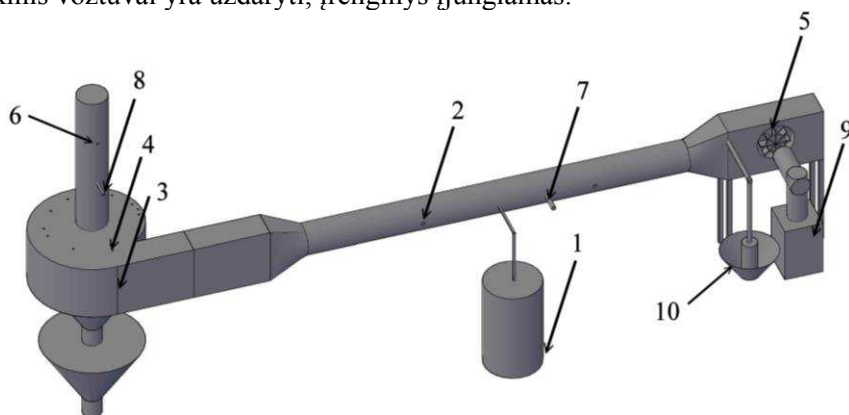
Eksperimentinis patobulinto daugiakanalio ciklono stendas (2.1 pav.) buvo įrengtas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos ir vandens inžinerijos katedros Aplinkosauginių technologijų laboratorijoje. Iš ventiliatoriaus tiekiamas dujų srautas teka ortakiu, kuris sujungtas su patobulinto daugiakanalio ciklono įtekėjimu į įrenginį.

Eksperimentinių tyrimų metu oras iš aplinkos patenka į ortakių sistemą. Oro srovė sudaroma veikiant išcentriniam ventiliatoriui ALTEKO RFE 355-30/2,2 su įrengtu išoriniu varikliu Lenz IE2 (maksimali galia 3 kW , sudaromas statinis slėgis 1500 Pa , didžiausias sudaromas oro srauto tūrio debitas – $1 \text{ m}^3/\text{s}$). Oro srautas reguliuojamas dažnių keitikliu nuo 0 iki 50 Hz . Įėjimo ortakis, nutiestas nuo ventiliatoriaus, vėliau yra suderinamas su atitinkamu įėjimu į patobulintą daugiakanalį cikloną.

Ortakiai su patobulintu daugiakanaliu ciklonu sujungiami, laikantis metodi-
nių nurodymų. Matavimai atliekami tiesiojoje ortakio atkarpoje $5-6 D_{ort.}$ prieš
cikloną ir atstumu $3-4 D_{ort.}$ už ciklono $D_{ort.}$ – ortakio skersmuo, kur nėra jokių
dujų srauto trikdžių: ventiliatoriaus, sklendės, alkūnės, ortakio susiaurėjimo ar
plėtėjimo ir pan. (Baltėnas and Chlebnikovas, 2016a).

Pagrindinis veiksnys, kuris sukelia eksploataavimo problemų dėl ciklono užsi-
kimšimo, yra didelio drėgnio dulkėtas dujų–oro–garų srautas. Didelio drėgnio
dujų srautas susidaro esant aukštai temperatūrai, pvz., kondensacijos metu ir pan.,
todėl buvo pritaikytas vidutinės galios autoklavas (2.2 pav.).

Autoklavo konstrukciją sudaro 40 litrų uždara cilindrinė talpa, kurioje įreng-
tas 3 kW galios kaitinimo elementas. Autoklavo cilindrinė dalis yra pripildoma
vandens ir sandariai uždaroma ventiliais. Įsitikinus, kad automatinis apsaugos ir
rankinis vožtuvai yra uždaryti, įrenginys įjungiamas.



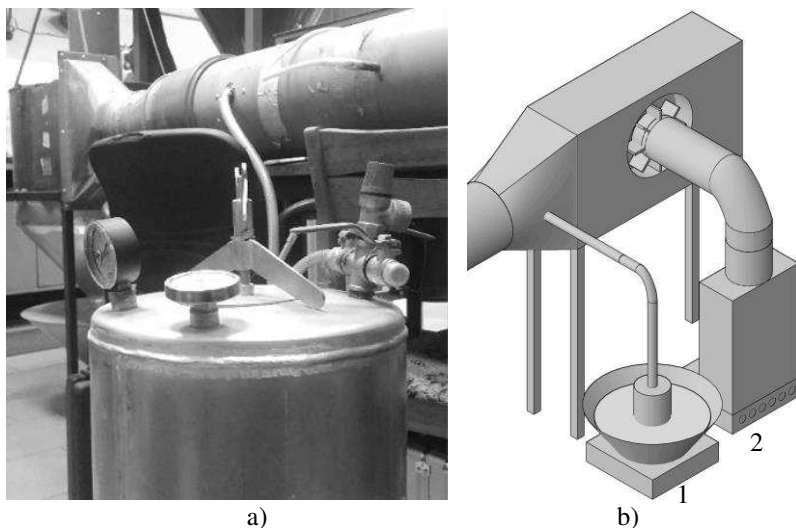
2.1 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono eksperimentinis stendas: 1 – autoklavas; 2 ir 6 – greičio matavimo taškas ortakyje prieš ir po ciklono; 3 – greičio matavimo taškas įtekėjime į cikloną; 4 – greičio matavimo taškas patobulinto daugiakanalio ciklono separavimo kameroje, kanaluose; 5 – ventiliatorius; 7 ir 8 – slėgio matavimo taškas prieš ir po ciklono; 9 ir 10 – anglies monoksido ir acetono imitaciniai šaltiniai (šaltinis: autorius)

Fig. 2.1. Newly designed multi-channel cyclone experimental stand: 1 – autoclave; 2 and 6 – velocity measuring point in the duct in front of and behind the cyclone; 3 – velocity measuring point in the inlet into the cyclone; 4 – velocity measuring point in the separation chamber of multi-channel cyclone, in the channels; 5 – fan; 7 and 8 – pressure measuring point in front of and behind the cyclone; 9 and 10 – carbon monoxide and acetone simulation sources (source: author)

Kaitinant vandenį autoklavo uždaroje talpoje, susidaro 6 bar slėgis bei 145 °C temperatūra, kuriems esant ima veikti automatinis vožtuvas. Darbo parametrai yra patikrinami pagal manometro ir termometro rodmenis. Įkaitintas didelio drėgnio

dujų–garų srautas į patobulinto daugiakanalio ciklono eksperimentinį stendą tiekiamas per jungiamąją aukštai temperatūrai ir dideliam drėgnumui atsparią žarnelę.

Agresyviųjų dujų srauto drėgnio ir temperatūros nustatymo tyrimai atlikti panaudojant daugiafunkcį matuoklį KIMO AMI 300 (santykinio drėgnio matavimo intervalas 5–95 %, skiriama geba – 0,1 %, santykinė paklaida – 0,1 %; temperatūros matavimas – (–20–180 °C), skiriama geba – 0,1 °C, sant. Paklaida – 0,3 %), kuriuo patobulinto daugiakanalio ciklono eksperimentiniame stende buvo išmatuotas dujų srauto santykinis drėgnis. Sumontuoti įėjimo į cikloną ir išėjimo iš ciklono 160 mm ortakiai.



2.2 pav. Agresyviųjų dujų srauto šaltinius imituojantys ir agresyviųjų dujų srautą sudarantys technologiniai įrenginiai: a) autoklavas; b) cheminių teršalų emisijų imitaciniai šaltiniai; 1 – kvarcinio smėlio pripildyta kaitinamoji cheminė vonia su acetono pripildyta kolba; 2 – mažos galios katilas (šaltinis: autorius)

Fig. 2.2. Aggressive gas flow imitation sources and aggressive gas flow forming process units: a) autoclave; b) emission sources for chemical pollutants; 1 – quartz sand filled hot tub with acetone filled flask; 2 – low power boiler (source: author)

Patobulinto daugiakanalio ciklono užsikimšimo tyrimai atlikti panaudojus lignino, medienos ir medienos pelenų kietąsias daleles, kurių dydis mažesnis nei 20 μm, praleidus 30 000, 50 000, 100 000 ir 150 000 m³ agresyviųjų dujų.

Atliktais tyrimais buvo ištirtas agresyviųjų dujų srautas, kurio sudėtyje buvo cheminių junginių. Panaudotas anglies monoksido imitacinis šaltinis – mažos galios katilas, kuriame buvo deginamas biokuras (2.1 pav.). Degimo metu išsiskiria anglies monoksidas (CO), kurio koncentracija parinkta, atsižvelgiant į iš kurą

deginančių įrenginių išmetamų teršalų ribines vertes, gautas deginant biokurą naujai įrengtame įrenginyje. Ši vertė parinkta kaip kraštutinis atvejis, kai leidžiama koncentracija yra lygi 4000 mg/m^3 – tai atitinka 3240 ppm (esant 101 325 Pa atmosferos slėgiui ir 0°C atmosferos temperatūrai). Pastovaus degimo procesas ir emisijų tolygumas buvo palaikomas reguliuojant pučiamo oro, tiekiamo į pakurą suspausto oro kompresoriumi, kiekį.

Organinių cheminių junginių emisijai sudaryti buvo naudojama kvarcinio smėlio pripildyta kaitinamoji cheminė vonia. Į cheminę vonią buvo įdėta 1 litro talpos kolba. Garuojant lakiesiems organiniams junginiams (LOJ) (acetonas), kolboje iki 0,5 litro žymės buvo nuolat papildoma LOJ (2.2 pav.). Koncentracija parinkta, atsižvelgiant į gamybos procesuose susidarančias LOJ emisijas, o ribinė koncentracija parinkta analogiška anglies monoksidui. Kadangi tarp pastarųjų cheminių junginių molekuliniai masių yra akivaizdus skirtumas, todėl kaip pagrindas dujų srauto tūryje buvo paimta acetono ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) (LOJ) masės koncentracija, t. y. $4\,000 \text{ mg/Nm}^3$, o tai atitinka 1560 ppm (esant 101 325 Pa atmosferos slėgiui ir 0°C atmosferos temperatūrai). Teršalų koncentracijos buvo parinktos taip, kad jų vertės mg/Nm^3 vienetais būtų lygios, taigi tik tokiu atveju šių teršalų įtaką galima palyginti tarpusavyje. Pastarosios teršalų koncentracijos buvo parinktos ir tam, kad būtų galima nustatyti agresyviųjų dujų srauto įtaką charakteringiems parametrams, taip pat užfiksuoti kraštutinius atvejus bei įvertinti patobulinto daugiakanalio ciklono valymo efektyvumą.

Dujinių teršalų koncentracijai nustatyti pasirinktas prietaisas „Testo 350–M/XL“, kurio veikimas pagrįstas elektrocheminiu metodu. Naudojant „Testo 350–M/XL“ galima ištirti O_2 , CO, NO, NO_2 ir SO_2 koncentracijas. Matavimų ribos: O_2 – 0–25 % (skiriamoji geba – 0,1 %, tūrinė sant. paklaida – 2 %), CO – 0–10 000 ppm (skiriamoji geba 1 ppm, sant. paklaida 5 ppm (0–99 ppm intervale), 5 % (100–2000 ppm intervale), 10 % (2001–10 000 ppm intervale), NO_x – 0–3000 ppm (skiriamoji geba 1 ppm, sant. paklaida 5 ppm (0–99 ppm intervale), 5 % (100–2000 ppm intervale), 10 % (2001–10 000 ppm intervale).

Organinių junginių koncentracijų matavimams buvo naudojamas MiniRAE 2000 nešiojamasis LOJ dujų analizatorius (modelis PGM7600). Matavimų ribos siekia nuo 0 iki 7000 mg/m^3 . Matavimo tikslumas teršalų koncentracijai, esant 0–2000 ppm, yra ± 2 ppm. Teršalų koncentracijai esant daugiau nei 2000 ppm, tikslumas – ± 20 %.

2.3. Paviršiaus glotnumo tyrimų metodika

Glotnumas arba, priešingai, paviršiaus šiurkštumas yra dažnai apibūdinamas, kaip paviršiaus švaros arba esamų nelygumų klasė. Taip pat jis gali būti siejamas su

esančiais arba nesančiais ant paviršiaus adsorbuotų pašalinių medžiagų, tokių kaip paviršinių aktyvių medžiagų, drėgmės ir kt.

Patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcija sudaryta iš metalinių elementų, kurių vidinių paviršių glotnumas daro įtaką SDKD adhezijai agresyviųjų dujų srauto valymo metu.

Paviršiaus glotnumui nustatyti buvo parinkti dažniausiai taikomi metalų paviršių pavyzdžiai: cinkuota skarda (markė S350GD+Z275 MA), nerūdijantis plienas (markė AISI 304 (EN 1.4306)) ir juodasis (paprastas) metalas (markė S235).

Agresyviųjų dujų valymo metu vyksta intensyvi SDKD adhezija, kuri priklauso ne tik nuo paviršiaus tipo, bet ir nuo jo glotnumo. Paviršiaus regeneravimui gali būti naudojamas šlifavimas (poliravimas) arba padengimas paviršiaus glotnumą didinančiomis medžiagomis. Metalų glotnumas buvo nustatytas skirtingai apdorojus jų paviršius – palyginamasis (neapdorotas), po šlifavimo smėliasrove (Powerplus SBC 420) bei padengus karščiui (iki 800 °C) ir dilimui padidinto atsparumo laku (sudėtis: solventnafta (nafta) (70 %), dervos (20–30 %), acetonas (ne daugiau nei 5 %), benzenas (ne daugiau nei 0,1 %)). Lako sudėtyje yra klampių alyvų, kurios užpildo dengiamame paviršiuje esamus įtrūkimus bei poras, o susidaranti plėvelė sutankėjus išlygina visus paviršiaus nelygumus. Lake esantis acetonas, kaip reagentas ir skiediklis, pagreitina polimerizacijos procesą. Polimerizacijos metu vyksta acetono garavimas ir jo kondensacija, solventnafta, benzenas ir kt. priedai polimerizuojasi, jie kristalizuojasi ir susidaro elastinės medžiagos. Esant įprastoms aplinkos sąlygoms (t. y. 20 °C temperatūrai) susidaręs sluoksnis sukieta ir tampa atsparus temperatūros ir cheminiam poveikiui, išskyrus sieros ar druskos rūgštis bei stiprius šarminius tirpalus. Padengtas sluoksnis gali būti nuimtas mechaniniu būdu.

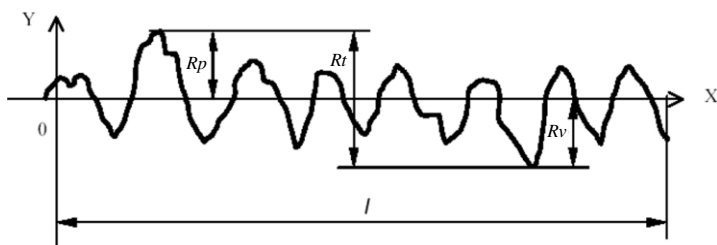
Mėginių paruošimas bei paviršiaus glotnumo nustatymo tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Medžiagotyros ir suvirinimo laboratorijoje.

Apdorotų metalų paviršių glotnumas buvo nustatytas skaitmeniniu profilometru su indukcinio deimantinės adatos jutikliu TR-200 (paklaida – ± 10 %). Veikimo principas pagrįstas ritės, esančios prietaise, indukcijos pokyčio, kuris vyksta dėl jutiklio poslinkio paviršiaus nelygumuose, registravimu. Induktyvumo pokytis generuoja analoginį signalą, proporcingą nelygumų dydžiams. Signalas yra apdorojamas fazės lygintuvu, sustiprinamas ir skaitiniu būdu apdorojamas. Prietaisais nustato tokius parametrus: Ra – vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, m; Rq – vidutinis kvadratinis profilio nuokrypis, m; Rz – profilio nelygumų aukščiai pagal 10 taškų, m; Rt – bendras nelygumų aukštis, m; Rp – didžiausios profilio iškylos aukštis, m; Rv – didžiausios profilio įdubos aukštis, m. Matavimų ribos siekia nuo 0,005 μm iki 16 μm (Ra , Rq), nuo 0,02 μm iki 160 μm (Rz , Rt , Rp) (2.3 pav.). Panaudotas profilometro jutiklis TS100, kurio eigos žingsnis buvo parenkamas

prietaisų automatiškai 0,25–2,5 mm intervale, priklausomai nuo paviršiaus glotnumo (Handbook of portable..., 2016).

Prieš tyrimą būtina išvalyti mėginio paviršių nuo galimų nešvarumų ir pašalinti riebalus. Profilometras yra patikimai pastatomas ant lygaus, nejudančio paviršiaus, korpusas turi būti orientuotas lygiagrečiai paviršiui, ant kurio yra pastatytas (2.4 pav.). Paviršiaus glotnumo jutiklio trajektorija turi būti statmena tiriamojo mėginio paviršiaus apdorojimui (Handbook of portable..., 2016).

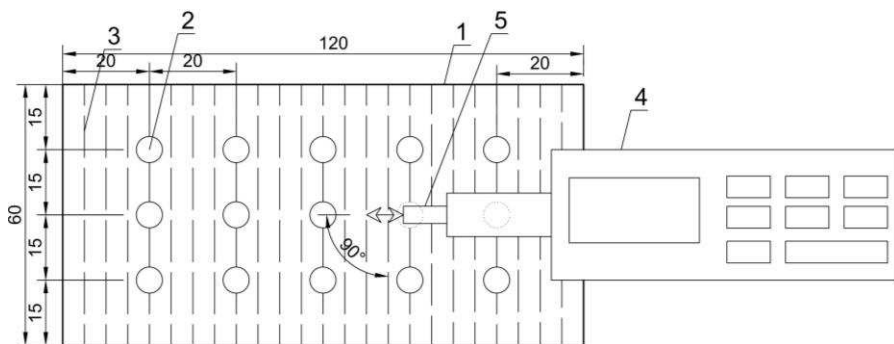
Ijungus prietaisą ir pradėjus analizės procesą, jutiklis pastoviu greičiu praeina pro mėginio paviršiaus glotnumo nustatymo zoną. Atlikus matavimą, duomenys apdorojami ir pavaizduojami rezultatai.



2.3 pav. Profilometru gautas paviršiaus profilis bei jį charakterizuojantys parametrai:

R_p – didžiausios profilio iškylos aukštis; R_t – bendras nelygumų aukštis; R_v – didžiausios profilio įdubos aukštis (šaltinis: autorius)

Fig. 2.3. Profilometer made surface profile and its characterized parameters: R_p – the highest profile protrusion; R_t – total roughness height; R_v – the highest profile recess (source: author)



2.4 pav. Mėginio paviršiaus glotnumo nustatymas: 1 – metalo paviršiaus mėginys; 2 – glotnumo nustatymo taškas; 3 – mėginio paviršiaus apdorojimo linijos; 4 – profilometras; 5 – profilometro jutiklis (šaltinis: autorius)

Fig. 2.4. The smoothness setting of sample surface: 1 – the metal surface of the sample; 2 – smooth set-point; 3 – the sample surface processing line; 4 – profilometer; 5 – profilometer's sensor (source: author)

Paviršiaus glotnumo nustatymui paruošti skirtingų metalų paviršiai buvo ištirti penkiuose skirtinguose pjūviuose statmenai jų apdorojimo linijoms. Taškai pasirinkti atsižvelgiant į mėginio paviršiaus matmenis (120×60 mm), išdėstyti simetriškai, vienodais išilgai 20 mm ir skersai 15 mm atstumais.

Kiekviename taške buvo išmatuoti profilio parametrai, o kiekvieno profilio parametro vertinimui buvo apskaičiuotas visų gautų verčių vidurkis (2.4 pav.). Metodika buvo parengta atsižvelgiant į ISO 8503–1:2012 standarto rekomendacijas, kurios skirtos plieno paviršiaus šiurkštumo charakteristikų nustatymui, taikant abrazyvo srauto apdorojimą (International organization..., 2012).

Ruošiant mėginius yra svarbus jų ilgis, kuris turi būti ne mažesnis negu glotnumo nustatymo prietaiso jutiklio eigos ilgis nustatymo metu, kitu atveju jutiklis nuo tiriamojo paviršiaus gali nuvirsti. Metalų paviršių mėginių matmenys buvo parinkti, remiantis standarto rekomendacijomis, t. y. esant vidutiniam aritmetiniam profilio nuokrypiui 0,02–0,32 μm buvo paimtas ne mažesnis nei 1,6 mm, o esant 0,32–2,5 μm – 4 mm suminis atkarpos ilgis glotnumui nustatyti skirtingų metalų visame mėginio paviršiaus plote (International organization..., 2012).

2.4. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto greičio tyrimų metodika

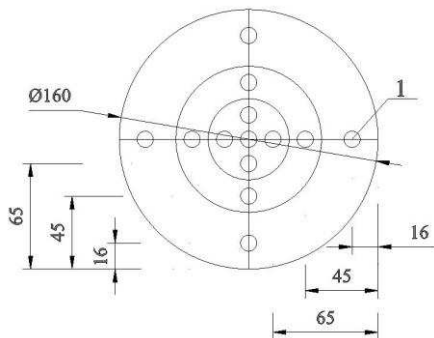
Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant dulkėtą dujų valymo įrenginį – patobulintą daugiakanalį cikloną. Patobulinto daugiakanalio ciklono matmenys: cilindrinio korpuso skersmuo – 0,53 m, bendras ciklono aukštis (su dviejų dalių kūginiais bunkeriu) – 1,10 m, srauto išteklėjimo angos skersmuo – 0,16 m, srauto įtekėjimo angos skersmuo – 0,16 m. Įtekėjimo anga iš ortakio į cikloną sudaryta iš įtekėjimo į pirmąjį kanalą – pirminio dujų srauto įtekėjimo, kurio matmenys – 0,040×0,29 m ir sujungtų trijų antrinių dujų srauto įtekėjimų į vieną bendrą ortakį, kurio matmenys – 0,12×0,29 m. Kiekvienas iš antrinių dujų srauto įtekėjimų ties kiekvienu 90° kampo posūkiu nuosekliai sujungtas su bendru ortakiu ir jo anga nukreipta į atitinkamą ciklono kanalą.

Separavimo kameroje vidinėje konstrukcijoje yra išdėstyti kreivalinijiniai ketvirtadalio žiedo formos elementai, kurių kampo posūkiai yra $\gamma = 0-\pi/2, \pi/2-\pi, \pi-(3/2)\pi, (3/2)\pi-2\pi$. Esant ciklonui, kuriame yra daugiau nei keturi kanalai, ketvirtadalio žiedo formos elementų išdėstymas yra sudaromas laikantis tokio pat kampo posūkio žingsnio. Patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukciją sudaro dujų srauto įtekėjimo į cikloną ir išteklėjimo iš ciklono ortakiai, pirminis ir antriniai dujų srauto įtekėjimai, separavimo kamera, kurioje yra įrengti kreivalinijiniai ketvirtadalio žiedo formos elementai, sudarantys keturis išorinius ir vieną vidinį centrinį kanalą, išorinis ir vidiniai plyšiai bei dviejų dalių kūginis bunkeris SDKD surinkti.

Analizuojant patobulintą daugiakanalį cikloną, remiantis ankstesniais tyrimais (Baltrėnas, Pranskevičius & Chlebnikovas, 2014; Baltrėnas and Chlebnikovas 2015a, 2015b; Chlebnikovas ir Baltrėnas 2015; Danilenkaitė, Chlebnikovas ir Vaitiekūnas, 2013), buvo pasirinktas optimalus 50 / 50 srautų pasiskirstymų santykių atvejis srautų persiskyrimo zonose, kuris buvo nustatytas, reguliuojant ketvirtadalio žiedo formos elementų padėtį (Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014). Tyrimams buvo naudojamas patobulintas daugiakanalis ciklonas su antriniais dujų įtekėjimais, panaudojant ketvirtadalio žiedo formos elementus su angų plokštelių atlenkimais, gaunant keturkanalį cikloną. Keturkanalį cikloną sudaro keturi ketvirtadalio žiedo formos elementai, įrengti ant separavimo kameros dugno.

Bendruoju atveju daugiakanalių ciklonų vidinė geometrija gali būti sudaryta reguliuojant srautų pasiskirstymų santykius srautų persiskyrimo zonose, kur atitekančias kanalu srautas dalijasi į periferinį (grįžtantį į ankstesnį kanalą) bei tranzitinį (tekantį į kitą kanalą įrenginio ašies link).

Greičio matavimo taškų išdėstymas patobulinto daugiakanalio ciklono eksperimentiniame stende pateiktas 2.1 paveiksle. Atliekant dujų srauto greičio tyrimus ortakiuose, skerspjūviai sąlygiškai padalijami į keletą koncentriškų žiedų, kurių skaičius priklauso nuo dujų greičių pasiskirstymo ypatumų ortakio skerspjūvyje (2.5 pav.).



2.5 pav. Dujų srauto greičio matavimo taškų išdėstymo schema ortakyje:

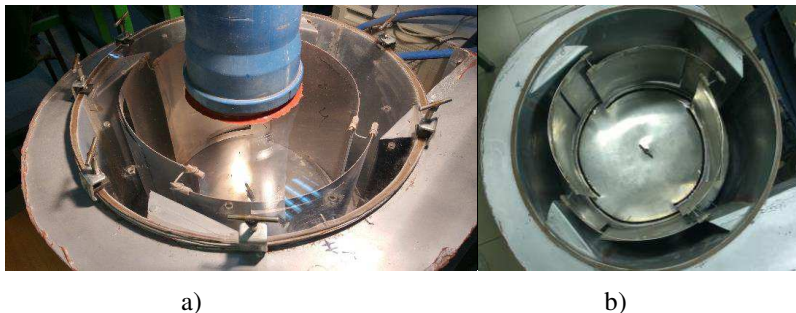
1 – matavimo taškas (šaltinis: autorius)

Fig. 2.5. Gas flow velocity measurement points scheme in the duct:

1 – measurement point (source: author)

Mažėjant simetriškumui ir greičių tolygumo pasiskirstymui, taip pat didėjant ortakio skersmeniui, žiedų skaičius turi didėti. Kiekviename žiede matavimo taškų atstumai nuo vidinės ortakio sienelės yra apskaičiuojami (Care et al., 2014).

Siekiant nustatyti vienfazio dujų srauto greitį matavimo taškuose, ciklono dangtyje parinktose vietose pragręžiamos kiaurymės (2.5 pav.), numatant galimybę jas užsandarinti.



2.6 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais eksperimentinis stendas: a) bendras vaizdas; b) vaizdas iš viršaus (šaltinis: autorius)

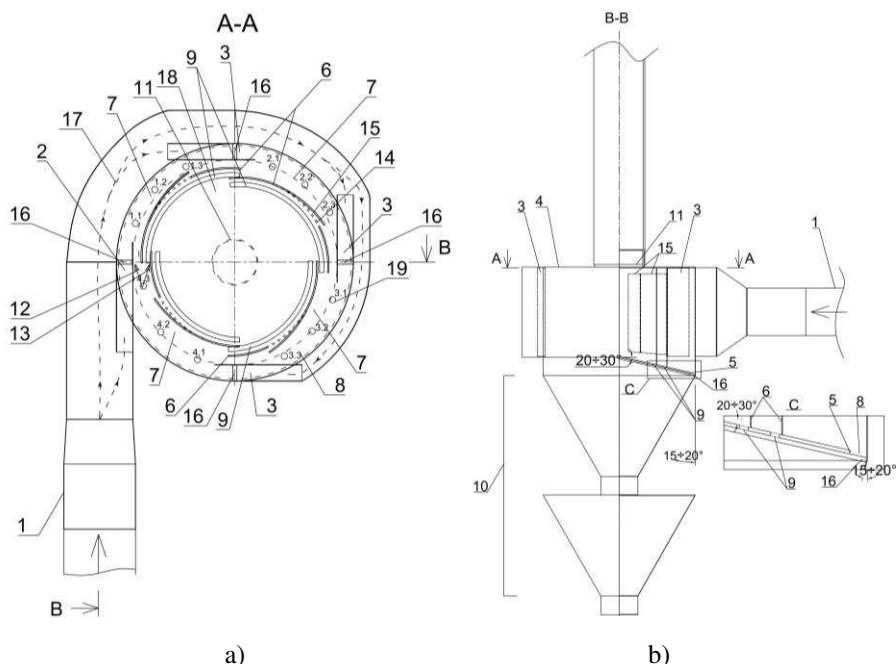
Fig. 2.6. Newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets: a) a main view; b) a top view (source: author)

Parinktieji taškai yra išsidėstę kanalo pradžioje (statmenai srauto įtekėjimui) bei linijose su poslinkiais nuo statmens srauto įtekėjimui 45° ir 90° kampų. Siekiant gauti vidutinį greitį skerspjūvyje, dujų srauto greičiai buvo nustatomi aukštyje, kuris lygus pusei kanalo aukščio, bei 5 mm atstumu nuo kanalo apatinio pagrindo (dugno) bei kanalo viršutinio pagrindo (dangčio) (Chlebnikovas ir Baltrėnas 2011; Jakštonienė 2012).

Dujų srauto tyrimai atlikti patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose nustačius skirtingus vidutinius greičius. Tiekiamas dujų srautas keičiamas ventiliatoriaus skaitmeniniame valdymo bloke esančiu apskukų reguliatoriumi. Taip patobulintame daugiakanaliame ciklone yra nustatomas tinkamas dujų srauto greitis. Panaudojant kreivalinijinius ketvirtadalio žiedo formos elementus ciklono kanaluose yra nagrinėjami atvejai nustatant 8 m/s, 12 m/s bei 16 m/s dujų srauto greitį.

Dujų srauto greičiai parinkti atsižvelgiant į ankstesnių atliktų tyrimų rezultatus, kai ciklono valymo efektyvumas buvo didžiausias, t. y., esant 12 m/s, bei parinkus papildomus kraštinius atvejus, esant 8 m/s ir 16 m/s (Baltrėnas and Chlebnikovas 2015a; Baltrėnas, Vasarevičius, Kazlauskienė ir Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas ir Baltrėnas 2015). Pito vamzdelis įstatomas į patobulinto daugiakanalio ciklono dangtyje parinktose vietose pragręžtas kiaurymės. Kol matavimas neatliekamas, Pito-Prandtlio vamzdelio galas turi būti nukreiptas pasroviui.

Patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais eksperimentinis stendas pateiktas 2.6 paveiksle.



2.7 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais principinė schema: a) vaizdas iš viršaus; b) profilis; 1 – užteršto dujų srauto ortakis; 2, 3 – pirminis ir antriniai dujų įtekėjimai; 4 – ciklono korpusas; 5 – išgaubtas separavimo kameros dugnas; 6 – išlenkti konfigūruoti kreivalinijinės ketvirtadalio žiedo formos elementai; 7 – ciklono išoriniai kanalai; 8 – išorinis išsistinis žiedinis plyšys; 9 – vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai; 10 – bunkeris arba keičiama kietųjų dalelių kaupimo talpa; 11 – išvalyto dujų srauto pašalinimo ortakis; 12, 13 – periferinis ir tranzitinis pasiskirstymo srautai; 14, 15 – ketvirtadalio žiedo formos elementuose išpjautos angos ir atlenktos 5° kampu plokštelės; 16 – tvirtinimo elementai; 17 – antrinių srautų trajektorijų linijos; 18 – tariamasis vidinis centrinis kanalas; 19 – matavimo taškas (šaltinis: autorius)

Fig. 2.7. Newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets principal scheme: a) upview; b) sideview; 1 – dusted gas flow inlet duct; 2, 3 – primary and secondary flow inlets; 4 – cyclone body; 5 – convex bottom of separation chamber; 6 – configured curved quarter-ring-formed elements; 7 – cyclone's external channels; 8 – outer ringed continuous slit; 9 – segmental ringed overlayed slits; 10 – hopper or changed PM storage capacity; 11 – cleaned gas flow removal outlet duct; 12, 13 – peripheral and transitional distributed flows; 14, 15 – opening slots with 5° angle folded plate in the quarter-ring-formed elements; 16 – fasteners; 17 – secondary flow guide; 18 – supposed internal central channel; 19 – measurement point (source: author)

Siekiant nustatyti dujų srauto turbulentiškumą, visais dujų srauto greičio atvejais yra apskaičiuojamas Reinoldso skaičius, nusakantis tekėjimo režimą.

Testo–350 daugiafunkcis matuoklis, tiesiogiai matuodamas dinaminį slėgį, atlieka perskaičiavimą į dujų srauto greitį. Perskaičiavimas atliekamas pagal 2.5 formulę (Chlebnikovas ir Baltrėnas 2015):

$$V = \sqrt{2g \cdot P_{din} / \rho_{d.s.}}, \quad (2.5)$$

čia g – laisvo kritimo pagreitis ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$); P_{din} – dinaminis dujų srauto slėgis matavimo taške, Pa; $\rho_{d.s.}$ – dujų tankis matavimo sąlygomis, kg/m^3 .

Detalios patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais schemos pateiktos 2.7 paveiksle.

Atmosferos slėgis matuojamas barometru, o temperatūra ir santykinis drėgnis laboratorijoje drėgnomačiu Extech M0290 (sant. drėgnio matavimo ribos – 0–100 %, skiriamaoji geba – 0,1 %; temperatūros matavimo ribos – (–29–77 °C), skiriamaoji geba – 0,1 %).

2.5. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto slėgių tyrimų metodika

Aerodinaminių parametrų tyrimuose atliekant slėgio tyrimus, yra vertinami trys skirtingi jo tipai. Pirmasis – dinaminis (greitinis) slėgis P_{din} yra lygus tokiam slėgiui, kuris reikalingas norint suteikti srautui tokį pagreitį, kad srautas iš ramybės būklės pasiektų atitinkamą greitį. Patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimuose slėgis matuojamas tiesioginiu būdu, panaudojant Pito vamzdelį ir daugiafunkcij matuoklį su priedėliu Testo–350. Jo vertės yra perskaičiuojamos dujų srauto greičio vertinimui, remiantis 2.1 formule.

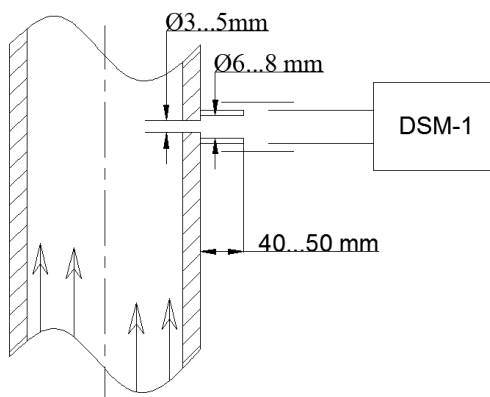
Statinis slėgis P_{st} atspindi 1 m^3 oro potencinę energiją, jis lygus slėgiui į ortakio sienelės. Ventiliatoriaus ir patobulinto daugiakanalio ciklono sistemos slėgiams nustatyti yra tiriamas statinis slėgis prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono, matuojant sukuriamas dujų srauto slėgis prieš patenkant į valymo įrenginį, bei dėl išpūtimo į aplinką sudaromas slėgis po ciklono. Tam tikslui yra naudojamas tik „+“ slėgio matuoklio jutiklis, jungiant su Pito vamzdelio žarnele. Tuo pačiu metu yra stebimas ir palaikomas pastovus dujų srauto greitis.

Pilnutinis slėgis P_p yra dinaminio P_{din} ir statinio P_{st} slėgio suma (2.6 išraiška):

$$P_p = P_{din} + P_{st}. \quad (2.6)$$

Dinaminio slėgio vertė visais atvejais yra teigiama, statinis ir pilnutinis slėgis siurbimo linijų sistemose būna mažesni už atmosferos – neigiami, slėgio linijų – teigiami.

Slėgio kritimui ciklono sistemoje nustatyti yra tiriamas aerodinaminis pasipriešinimas, kuris eksploatuojant patobulintą daugiakanalį cikloną nulemia energijos sanaudas. Dažnai šis parametras vadinamas slėgio nuostoliais. Kadangi dujoms tiekti naudojama energija, o ne slėgis, todėl tikslinga vartoti sąvoką „energijos nuostoliai“. Aerodinaminis pasipriešinimas išmatuojamas pagal statinio slėgio skirtumą įeinančiame ir išeinančiame ortakiuose. Statinio slėgio matavimas ortakyje pavaizduotas 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Statinio slėgio ortakyje tyrimo taško įrengimas (šaltinis: autorius)

Fig. 2.8. Installation of a static pressure research point in the duct (source: author)

Tyrimai atliekami ortakio centre ir kiekviename parinktame taške. Pneumatinio vamzdelio galas nukreipiamas prieš dujų tėkmės kryptį. Dinaminis vamzdelis stumiamas per skersmenį nuo artimesnės ortakio sienelės prie tolimesnės, sustojant kiekviename parinktame taške, o paskui atvirkščiai (traukiamas nuo tolimesnės ortakio sienelės iki artimesnės). Tame pačiame taške rodmenys neturi skirtis daugiau kaip 15 %.

Dujų srauto slėgio tyrimuose naudotas diferencialinis slėgio matuoklis DSM–1 (matavimo ribos – 0–20 000 Pa; paklaida – ± 5 Pa), kuris buvo jungiamas žarnelės su angomis slėgio nustatymui prieš ir po ciklono, taip nustatant ciklono aerodinaminį pasipriešinimą (Zagorskis, 2009).

Slėgiams prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono tirti ortakiuose parinktose vietose buvo pragražtos kiaurymės ir įmontuoti metaliniai 50 mm ilgio atvamzdžiai (2.1 pav., 7 ir 8 taškai). Vienu metu prijungus prie diferencialinio slėgio matuoklio DSM–1 žarnelės nuo įeinančio srauto ortakio (+) ir išeinančio

srauto ortakio (–), keičiant pereinantį per patobulinto daugiakanalio ciklono sistemą srauto debitą, pagal matuoklio rodmenis fiksuojamas sukuriamas įrenginio aerodinaminis pasipriešinimas.

Tyrimuose pasirinktas optimalus atvejis, kai keturkanaliame ciklone pagal ankstesnius tyrimus yra pasiektas maksimalus kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas, t. y. 50 / 50 srautų pasiskirstymo santykių atvejis (Baltrėnas et al., 2014a). Vidutinis dujų srauto greitis ciklono kanaluose, kaip ir dujų srauto greičio tyrimuose, yra pasirinktas 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s.

2.6. Patobulinto daugiakanalio ciklono bendro kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų metodika

Patobulinto daugiakanalio ciklono, skirto užteršto dujų srauto valymui, eksperimentiniams efektyvumo nustatymo tyrimams buvo naudojamos lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD. Prieš atliekant tyrimus, kietosios dalelės sijotos per sietus, panaudojant bandinių kratytuvą Rotoshake RS 12. Tyrimams naudoti MORIS 20 μm akučių dydžio sietai. Eksperimentiniuose tyrimuose, siekiant patobulintame daugiakanaliame ciklone nustatyti adhezijos procesus, naudotos mažesnės nei 20 μm skersmens kietosios dalelės. Valymo efektyvumo nustatymui papildomai yra išskiriamos SDKD, t. y. 1–10 μm skersmens kietosios dalelės. Sijojimo trukmė, reikalinga vienam SDKD mėginiui paruošti (50 g), buvo 10 min.

Prieš pradėdant tyrimus, silikoninėmis žarnelėmis sujungiami oro filtrų patronai su atvamzdžiais, kurie įstatomi į įeinančio ir išeinančio oro srautų ortakius. Įsukami atvamzdžių antgaliai, kurių vidinis skersmuo parenkamas priklausomai nuo dujų srauto greičio ortakyje. Į patronus įstatomi kietąsias daleles sulaikantys AFA–VP–20 filtrai. Antrąją žarnelę sujungiamas antrasis patrono antgalis ir aspiratoriaus įėjimas siurbiamam orui. Pagal žinomą prasiurbto oro tūrio reikšmę bei filtrų masių skirtumą prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono, apskaičiuojamas kietosiomis dalelėmis užteršto oro valymo efektyvumas (Jakštonienė 2012).

Siekiant teisingai nustatyti kietųjų dalelių koncentraciją, imant vienkartinis oro mėginius, yra išlaikomos izokinetinės sąlygos, kai siurbiamo per filtrą oro greitis yra lygus priešpriešinio srauto greičiui. Greičiai suvienodinami naudojant kūginius antgalius, kurie parenkami atsižvelgiant į srauto greitį ir per filtrą siurbiamo oro greitį. Filtrų laikiklis nukreipiamas prieš dujų srautą. SDKD kartu su 6 barų slėgiu suspaustu švarių sausų oru tiekiamos per purkštuką. SDKD nustatomų koncentracijų stabilumui užtikrinti tyrimai yra pakartojami ne mažiau nei tris kartus. Gautos vertės yra analizuojamos tik tuo atveju, kai analogiškų tyrimų rezultatai skiriasi ne daugiau kaip 5 % (pasikliautinasis intervalas – 95 %).

Kietųjų dalelių koncentracijai nustatyti pasirinktas svorio metodas. Principas: kietosios dalelės sulaikomos filtru, prasiurbiant per jį tam tikrą oro tūrį, ir svėrimo būdu nustatoma kietųjų dalelių masė. Metodo santykinė paklaida neviršija $\pm 25\%$ (Chlebnikovas ir Baltrėnas 2012). Valymo efektyvumo tikslumui užtikrinti buvo stebimas įleistų į ortakį prieš cikloną ir sugautų bunkeryje SDKD masės skirtumas. Rezultatai tarp gautų rezultatų abiem metodais skyrėsi iki 10% .

Prieš paimant ėminį, filtras pasveriamas analitinėmis svarstyklėmis Radwag AS-60/220.X2 (masės nustatymas $3\text{ mg} - 220\text{ g}$; skiriamaoji geba – $0,015\text{ mg}$; paklaida $\pm 0,06\text{ mg}$). Prieš tai jis 1 valandą laikomas patalpoje, kurioje sveriamas. Kietųjų dalelių koncentracijai nustatyti tiriamas oras siurbliu SKC Flite 3 (traukimo greitis $2-20\text{ l/min}$, skiriamaoji geba $0,5\text{ l/min}$, paklaida $\pm 5\%$) traukiamas per filtrą $10-20\text{ l/min}$ greičiu. Po to nustatoma kietųjų dalelių masė ant filtro laboratorijoje. Prieš svėrimą filtras ne trumpiau kaip valandą laikomas patalpoje, kurioje bus sveriamas. Nustatoma kietųjų dalelių koncentracija ir perskaičiuojamas per filtrą prasiurbto oro tūris normaliosioms sąlygoms.

Patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimuose naudotos skirtingos prigimties SDKD (2.9–2.11 pav.).

Buvo nustatyti tyrimuose naudojamų SDKD pagrindiniai fizikiniai parametrai, kurie pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Smulkiadispersių kietųjų dalelių fizikiniai parametrai (šaltinis: autorius)

Table 2.1. Fine-dispersed PM physical properties (source: author)

Parametras	Ligninas	Mediena	Medienos pelenai
Mėginio skeleto tankis, kg/m^3	278	184	624
Įsotinto mėginio tankis, kg/m^3	1620	1184	2238
Bendrasis poringumas, %	65–75	65–80	25–35
Bendrasis tankis, kg/m^3	800–1100	500–800	800–900
Piltinis tankis, kg/m^3	580	455	710

Išmatuojama kietųjų dalelių koncentracija prieš ir po ciklono. Remiantis tyrimų duomenimis, apskaičiuojamas kietųjų dalelių šalinimo patobulintame daugiakanaliame ciklone efektyvumas.

Kietųjų dalelių dispersinės sudėties bei formos ir paviršiaus nustatymas buvo atliktas Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos mokslo institute.

Viena iš svarbiausių kietųjų dalelių charakteristikų yra dispersiškumas – kietųjų dalelių pasiskirstymas pagal dydį.

Kietųjų dalelių dispersinės sudėties nustatymas atliktas lazeriniu granulometru CILAS 1090. Pakartojamumas (paklaida) – ne daugiau 1 %, tikslumas (paklaida) – ne daugiau 3 %. Matuojamų kietųjų dalelių skersmuo (Cilas 1090..., 2016):

- matavimas skystyje: nuo 0,04 μm iki 500 μm ;
- matavimas sausiai: nuo 0,1 μm iki 500 μm .

Kietųjų dalelių skersmens matavimas netirpioms medžiagoms atliekamas jas disperguojant vandenyje ir praleidžiant suspensiją pro stiklinę matavimo celę. Per celę praeinantis lazerio spindulys dėl difrakcijos reiškinių kietųjų dalelių yra išsklaidomas ir iš dalies atspindimas. Kuo smulkesnė medžiaga, tuo didesniu kampu yra išsklaidomas lazerio spindulys.

Matuojant išsklaidytos šviesos intensyvumą, naudojant Fraunhoferio arba Mie teorijas, apskaičiuojami bandinio kietųjų dalelių skersmenys. Mie teorija taikoma, kai medžiagoje yra daug mažesnių už 1 μm kietųjų dalelių. Kai medžiaga reaguoja su disperguojančia terpe arba joje tirpsta, naudojamas pneumatinis matavimo būdas. Šiuo atveju miltelinė medžiaga vibro dozatoriumi teikiama į suspausto oro srovę, kuri kerta matavimo celę su lazerio spinduliu. Išsklaidytos šviesos intensyvumas matuojamas analogiškai (Cilas 1090..., 2016).

Lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD dispersinė sudėtis pateikta 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Lignino, medienos ir medienos pelenų smulkiadispersių kietųjų dalelių dispersinė sudėtis (šaltinis: autorius)

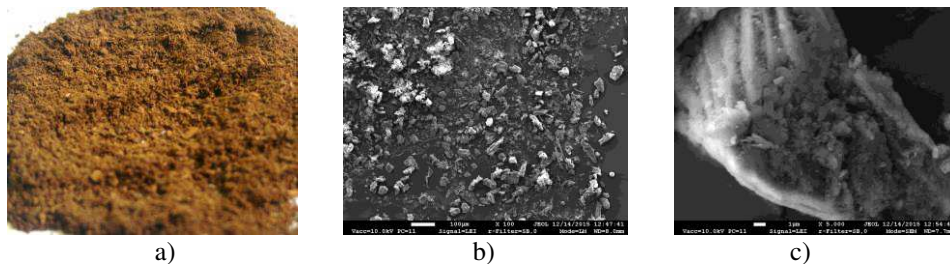
Table 2.2. Lignin, wood and wood ash fine-dispersed particles dispersion composition (source: author)

Dispersinė sudėtis, μm	Skirtingos prigimtės dalelių procentinis pasiskirstymas, %		
	Lignino	Medienos	Medienos pelenų
0,–1,0	3,2	0,8	2,4
1,0–2,5	7,6	4,9	5,6
2,5–10,0	19,7	34,2	33,3
10,0–15,0	26,7	34,1	33,9
15,0–20,0	42,8	26,0	24,8

Kietųjų dalelių formos ir paviršiaus nustatymui buvo atlikti tyrimai, panaudojant skenuojantį elektrinį mikroskopą JEOL JSM-7600F komplekte su automatinio mėginio paruošimo įrenginiu Quorum Q150R ES. Mažų aberacijų objektyvo lęšiai leidžia pasiekti stabilų aukštos raiškos vaizdą, net esant aukštai šviesos pluošto srovei (daugiau nei 200 nA, esant 15 kV). Todėl gali būti atlikta didelio tikslumo nanostruktūrų analizė. Prietaiso didinimas nuo 25 iki 10^6 kartų. Erdvinė raiška – iki 1 nm, esant 15 kV srovei.

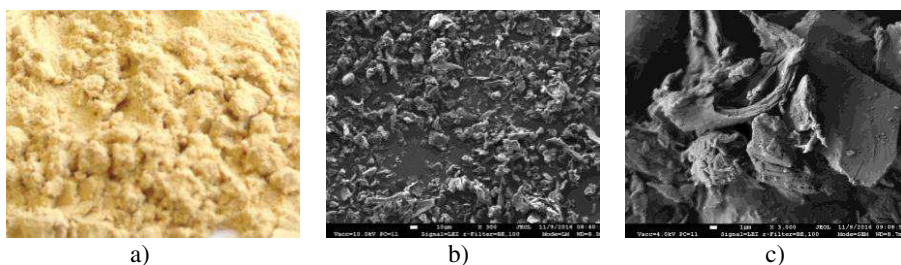
Mėginiai prieš skenavimą buvo apdoroti skystu azotu bei padengti anglies sluoksniu. Kiekvienas iš bandinių buvo priklijuotas prie mikroskopo laikiklio

angliniais lipdukais ir įterptas tarp plokštelių, kurios vakuuminiu būdu buvo iš anksto padengtos laidžiu aukso sluoksniu (Wilkinson and Britton, 2012; Redigolo, 2017). Lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD vaizdai pateikti 2.9–2.11 paveiksluose.



2.9 pav. Lignino kietųjų dalelių: a) grudeliai (x1); b) aglomeratai (x100); c) grudelio makrostruktūra (x5000) (šaltinis: autorius)

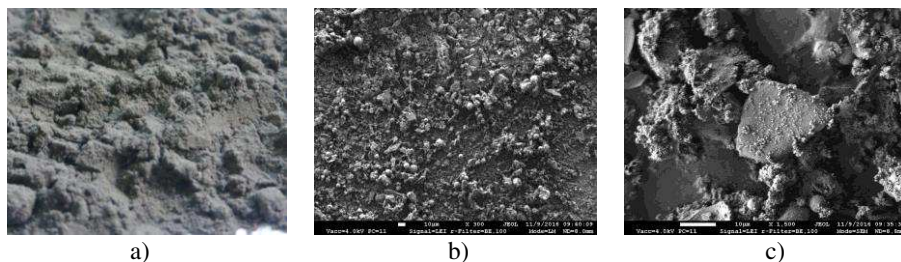
Fig. 2.9. Lignin particulate matter: a) grains (x1); b) agglomerates (x100); c) macrostructure of grain (x5000) (source: author)



2.10 pav. Medienos kietųjų dalelių vaizdas, panaudojant skenuojantį elektrinį mikroskopą: a) grudeliai (x1); b) aglomeratai (x300); c) grudelio makrostruktūra (x3000) (šaltinis: autorius)

Fig. 2.10. Wood particulate matter view used scanning electron microscope: a) grains (x1); b) agglomerates (x300); c) macrostructure of grain (x3000) (source: author)

Analizuojant visų nustatytų lignino SDKD dydžius, yra gauta, kad kietųjų dalelių nuo 0,1 μm iki 1 μm buvo 3,2 %, nuo 1,0 μm iki 2,5 μm – 7,6 %, nuo 2,5 μm iki 10,0 μm – 19,7 %, nuo 10,0 μm iki 15,0 μm – 26,7 %, nuo 15,0 μm iki 20,0 μm – 42,8 %. Vidutinis skersmuo lygus 12,2 μm .



2.11 pav. Medienos pelenų kietųjų dalelių vaizdas, panaudojant skenuojantį elektrinį mikroskopą: a) grudeliai (x1); b) aglomeratai (x300); c) grudelio makrostruktūra (x1500) (šaltinis: autorius)

Fig. 2.11. Wood ash particulate matter view used scanning electron microscope: a) grains (x1); b) agglomerates (x300); c) macrostructure of grain (x1500) (source: author)

Medienos SDKD nuo $0,1\ \mu\text{m}$ iki $1,0\ \mu\text{m}$ – 0,8 %, nuo $1,0\ \mu\text{m}$ iki $2,5\ \mu\text{m}$ – 4,9 %, nuo $2,5\ \mu\text{m}$ iki $10,0\ \mu\text{m}$ – 34,2 %, nuo $10,0\ \mu\text{m}$ iki $15,0\ \mu\text{m}$ – 34,1 %, nuo $15,0\ \mu\text{m}$ iki $20,0\ \mu\text{m}$ – 26,0 %. Vidutinis skersmuo lygus $11,0\ \mu\text{m}$. Medienos pelenų SDKD nuo $0,1\ \mu\text{m}$ iki $1\ \mu\text{m}$ – 2,4 %, nuo $1\ \mu\text{m}$ iki $2,5\ \mu\text{m}$ – 5,6 %, nuo $2,5\ \mu\text{m}$ iki $10\ \mu\text{m}$ – 33,3 %, nuo $10\ \mu\text{m}$ iki $15\ \mu\text{m}$ – 33,9 %, nuo $15\ \mu\text{m}$ iki $20\ \mu\text{m}$ – 24,8 %. Vidutinis skersmuo lygus $10,8\ \mu\text{m}$.

Kaip galima matyti iš pateiktų duomenų, SDKD yra gana skirtingų fizikinių savybių (2.9–2.11 pav.). Kadangi visos SDKD yra iš anksto paruošiamos (džiovinamos, smulkinamos bei sijojamos), kietųjų dalelių skersmenys tarpusavyje yra panašūs, smulkiausias iš visų yra medienos pelenų kietosios dalelės, kurių vidutinis skersmuo siekia $10,8\ \mu\text{m}$. Visuose nagrinėjamuose mėginiuose mažesnių nei $10\ \mu\text{m}$ SDKD dalis siekia 30–40 %.

2.7. Patobulinto daugiakanalio ciklono $2,5\ \mu\text{m}$ ir $10\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų metodika

Smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo, taikant patobulintą daugiakanalį cikloną su antriniais dujų įtekėjimais, efektyvumo nustatymas, panaudojant kaskadinio impaktoriaus sistemą, yra pagrindinis tyrimų uždavinys, kuris nulemia dujų valymo įrenginio pritaikymą, atskiriant skirtingo dispersiškumo kietąsias daleles bei jo efektyvumą. Panaudojant kaskadinio impaktoriaus sistemą, kietųjų dalelių koncentracijos nustatomos svorio metodu. Impaktoriaus pakopose naudojami skirtingą porų dydį turintys KALMAN tipo kvarciniai filtrai leidžia nustatyti atskirų kietųjų dalelių frakcijų koncentracijas. Visa impaktoriaus sistema

yra suderinta tarpusavyje. Pirmajame matavimo etape vienu metu atliekami temperatūros, dujų srauto greičio bei statinio ir dinaminio slėgio matavimai.

Kietųjų dalelių šalinimo iš dujų srauto tyrimai atlikti panaudojant lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD. Minėtos kietosios dalelės dujų sraute susidaro pramonėje technologinių procesų metu (Wada et al., 2009). Tyrimais siekiama nustatyti geriausią nagrinėjamo valymo įrenginio pritaikymą tam tikroje pramonės šakoje, atsižvelgiant į pasirinktų kietųjų dalelių fizines savybes: tankį, piltinį tankį ir dispersiškumą. Kaip ir aprašytoje valymo efektyvumo nustatymo metodikoje, atskirų frakcijų kietųjų dalelių koncentracijos, panaudojant kaskadinio impaktoriaus sistemą, nustatomos vienu iš labiausiai taikomų koncentracijos nustatymo metodų – svorio metodu. Šiuo atveju atskiros kietųjų dalelių frakcijos sulaikomos ant impaktoriaus patrone esančių skirtinguose pakopose kvarcinių filtrų. Valdymo blokas automatiškai reguliuoja prasiurbiamo pro impaktorių oro tūrį. Įvedami duomenys gauti svėrimo būdu, nustačius filtrų mases prieš ir po tyrimo. Turimi įvesties duomenys apdorojami ir suformuojami tyrimo rezultatai. Metodas, palyginti su kitais koncentracijos nustatymo metodais, yra gana tikslus, santykinė paklaida neviršija $\pm 25\%$.

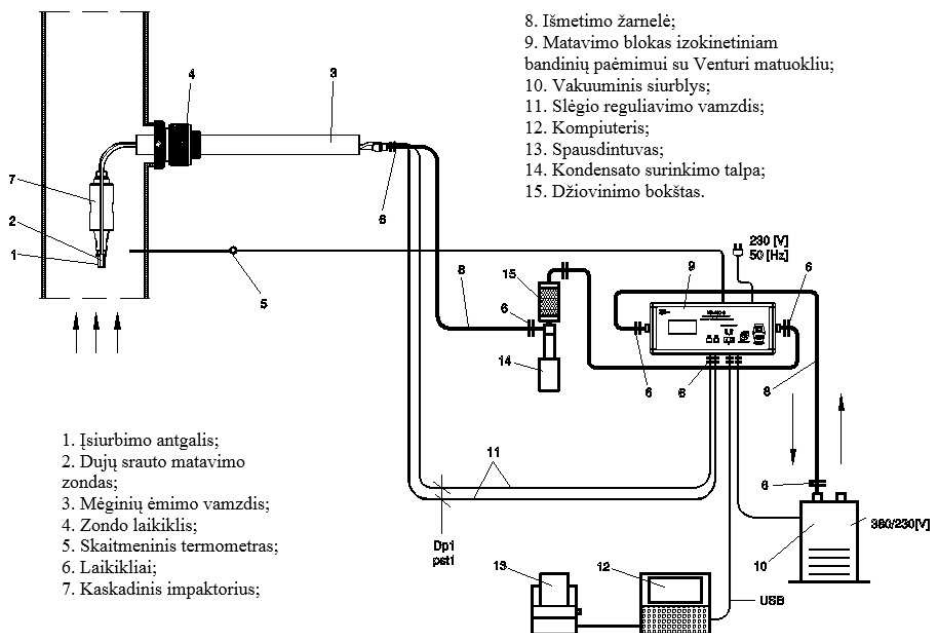
Bandinių paruošimas tyrimams yra identiškas nurodytam metodo aprašymui, atliekant patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais bendro valymo efektyvumo tyrimus.

Eksperimento metu naudojama kaskadinio impaktoriaus sistema (2.12 pav.).

Kaskadinio impaktoriaus sistemos techninė specifikacija:

- 6 pakopų impaktorius su galutiniais filtrais, kurių skersmuo – 43 mm, maksimalus debitas – $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Siurbimo antgaliai, kurių skersmuo: 4,5 mm; 5,6 mm; 7,6 mm; 10,7 mm; 14 mm; 17 mm;
- Izokinetinis kombinuotas zondas su Haenni tipo vamzdeliu: skersmuo – 32 mm; ilgis – 2000 mm;
- Matavimo blokas izokinetiniam bandinių paėmimui su Venturi matuokliu, dviem slėgio skirtumo ir absoliutinio slėgio davikliais, temperatūrai ($0\text{--}100^\circ\text{C}$), matavimo ribos $3\text{--}60 \text{ m/s}$;
- Kondensato surinkimo talpa;
- Džiovinimo bokštas su filtrais, skersmuo – 70 mm;
- Ėminių paėmimo įrenginys, maksimalus debitas – $8 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Silikoninė žarnelė: 2 vnt., išorinis skersmuo – 8 mm, vidinis skersmuo – 4 mm, ilgis – 30 m;
- stiklo pluošto filtrai, skersmuo – 43 mm;
- stiklo pluošto filtrai, skersmuo – 70 mm;
- Programinė įranga duomenų apdorojimui ir pavaizdavimui, sąsaja su nešiojamuoju kompiuteriu;
- Temperatūros matavimo įranga, ribos $0\text{--}600^\circ\text{C}$.

Sujungus įrangą pagal 2.12 paveiksle pateiktą schemą bei prijungus prie kompiuterio, yra paleidžiama AR-IZO programa. Pasiruošimas matavimui susideda iš dviejų dalių: paties matavimo parengimo ir specifikacijos bei naudojamų mėginio ėmimui gaudyklių plokštelių (filtrų) įvesties į programą. Filtrų, sulaikymo plokštelių svėrimas ir paruošimas atliekamas laboratorijoje, naudojant analitines svarstykles.



2.12 pav. Kaskadinio impaktoriaus sistema (Kalman system, 2019)

Fig. 2.12. Cascade impactor system (Kalman system, 2019)

Įvertinus filtrų mases, pasirenkama mėginio ėmimo parinktis, įtraukiant greičio matavimą prieš mėginio paėmimą, kuriuose atliekami tyrimai. Kiekvieno matavimo metu atliekamas naujas barometrinio slėgio matavimas, kuris tęsiasi 10 sekundžių. Kietųjų dalelių atskirų frakcijų koncentracijos tyrimai atliekami remiantis ISO 9096 standartu, kuris pritaikytas koncentracijų matavimams nuo 20 mg/m^3 iki 1000 mg/m^3 . Vidutinis dujų srauto greitis ir tūrio debitas nustatytas 30 sekundžių laiko intervale, kurio metu fiksuojamos momentinės dujų srauto greičio vertės (International organization..., 2017).

Greičio matavimo metu programoje tiesiogiai atspindi esamos diferencinio, statinio slėgio, temperatūros bei greičio vertės, parodomas dujų srauto greičio kitimas (2.13 pav.).

Kietųjų dalelių koncentracijos tyrimas atliktas prijungus izokinetinį zondą kartu su prijungtu kaskadiniu impaktoriumi. Tyrimai atliekami, nustatant 180 sekundžių matavimo trukmę.

Ant kaskadinio impaktoriaus sulaikymo plokštelių sudedami filtrai: 10A, 10B, 2,5A, 2,5B, 1A, 1B ir galinis filtras. Filtruose esančių porų skersmuo atitinka nurodytą skaičių prie jo tipo. A ir B filtrų plokštumos sudaro bendrą atskiros frakcijos ėminį – todėl apdorojant rezultatus ant jų sugautų kietųjų dalelių masės yra sumuojamos.

Tyrimo metu, siekiant išlaikyti izokinetines sąlygas, naudojamas atitinkamas antgalio skersmuo nurodomas programa automatiškai, atsižvelgiant į dujų srauto greitį bei skerspjūvį tyrimo taške bei automatiškai reguliuojamas dujų siurblio variklio traukimo greitis, atsižvelgiant į pagrindinio ir dalinio dujų srautus.

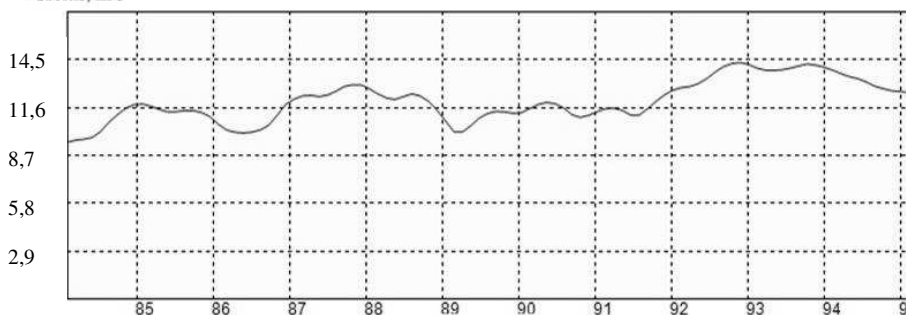
Siekiant sumažinti galimas sistemos tyrimo paklaidas, atliekant mėginio ėmimo tyrimą, panaudojant kaskadinio impaktoriaus sistemą, kietųjų dalelių koncentracijos nustatymo tyrimas pagal anksčiau aprašytą tyrimo metodiką tuo pačiu metu nustatomas ir svoriniu metodu.

Dp1 = 0,20 [mbar]	Tau = 60 [sec]
pst1 = 0,964 [bar]	KS-220
t1 = 25,2 [°C]	Matavimo laikas
	146 [mm]
AVG w1 = 0 [m/s]	Pradėti matavimą
w1 = 12,2 [m/s]	Likęs laikas: 00:00:30

a)

b)

Greitis, m/s



Laikas, s

c)

2.13 pav. Greičio kitimo rezultato vaizdavimas: a) dujų srauto parametrai; b) įvesties duomenys; c) dujų srauto greičio kitimo kreivė (šaltinis: autorius)

Fig. 2.13. Velocity value change monitoring: a) gas flow parameters; b) input data; c) a curve of gas flow velocity change (source: author)

Tyrimo rezultatai gauti išanalizavus filtrų masių pokytį prieš ir po mėginio ėmimo. Pagal nustatytas sugautų kietųjų dalelių procentines dalis, kurios nustatomos prieš bei po patobulinto daugiakanalio ciklono, apskaičiuojami $1\ \mu\text{m}$, $2,5\ \mu\text{m}$ ir $10\ \mu\text{m}$ skersmens kietųjų dalelių šalinimo efektyvumai.

Kaskadinio impaktoriaus temperatūros matavimo zondo santykinė paklaida neviršija $\pm 2\%$; dujų srauto greičio pataisos koeficientas lygus 1,0133, statinio ir dinaminio slėgio nustatytų reikšmių santykinė paklaida neviršija $\pm 1\%$, atskirų frakcijų kietųjų dalelių koncentracijų santykinė paklaida, nustatoma svorio metodu, lygi $\pm 25\%$. SDKD nustatomų koncentracijų stabilumui užtikrinti tyrimai yra pakartojami ne mažiau nei tris kartus. Gautos vertės yra analizuojamos tik tuo atveju, kai analogiškų tyrimų rezultatai skiriasi ne daugiau kaip 5% (pasikliautinis intervalas – 95%).

2.8. Kietųjų dalelių ir dujų judėjimo procesų skaitinio modeliavimo metodika

Skaitinis modeliavimas atliekamas siekiant nustatyti užteršto SDKD dujų srauto dinaminis parametrus bei agresyviųjų dujų srauto įtaką patobulinto daugiakanalio ciklono darbui bei parinkti optimalius parametrus, išvengiant papildomų kaštų eksperimentinio stendo gamybai, derinimui ir tobulinimui.

Patobulinto daugiakanalio ciklono geometrija buvo sukurta naudojant CAD grafinį redaktorių, naudojant parametrinį objektų projektavimą, sudarant plokštuminius ir erdvinis elementus. Skaitinio daugiakanalio ciklono parametrai buvo parinkti pagal patobulinto daugiakanalio ciklono eksperimentinio stendo parametrus. Skaitinio modelio dvifazio (dujų (oro), kietųjų dalelių) srauto ciklone tyrimai ir analizė atlikta taikant ANSYS programinio paketo Fluent paprogramį.

Atliktuose kitų mokslininkų tyrimuose, dažnai apsiribojama vienu klamos modeliu, kuris neretai taikomas standartinėje parinktyje arba nustatant automatinį parametrų parinkimą. Tuo tikslu buvo parinkti skirtingi klamos modeliai pagal savo kintamuosius, o jautrumo analizei atlikti buvo taikomos ir modelio modifikacijos.

Skaiciavimuose panaudoti k –epsilon ir k – ω (*omega*) turbulentinės klamos modeliai ir jų modifikacijos – k – ϵ (*epsilon*) ir k – ϵ RNG (angl. *Re-Normalisation Group*) (patobulintas turbulentinės kinetinės energijos (t. k. e.) ir kinetinės energijos disipacijos greičio modelis) ir k – ω SST (t. k. e. ir kinetinės energijos disipacijos lyginamojo greičio) (Naik, Khatua, Wright, Sleight & Singh, 2018). Taikant k – ϵ modelį, yra sprendžiama dviejų nelineinių difuzijos lygčių sistema (2.7 ir 2.8 formulės) – t. k. e. tankio k_p ir kinetinės energijos disipacijos greičio ϵ – greitis, kuriuo t. k. e. virsta šiluma dėl klamos trinties (Авраменко, 2010):

$$\rho_f \frac{dE_k}{dt} = \frac{2}{3} k \frac{d\rho_f}{dt} - \rho_f \varepsilon_1 + \rho_f (G_S + G_B) + \operatorname{div} \left(\frac{\nu_T}{\operatorname{Pr}_k} \rho \nabla k \right); \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \rho_f \frac{d\varepsilon}{dt} = & c_{\varepsilon 3} \varepsilon \frac{d\rho_f}{dt} - c_{\varepsilon 2} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} + \rho_f \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} G_S + c_{\varepsilon 0} G_B) + \\ & + \operatorname{div} \left(\frac{\nu_T}{\operatorname{Pr}_\varepsilon} \rho_f \nabla \varepsilon \right), \end{aligned} \quad (2.8)$$

čia ρ_f – fazės tankis, kg/m^3 ; dE_k/dt – t. k. e. kitimas laike, J/s ; ε_1 – disipacijos koeficientas; G_S – kintamo turbulentiškumo koeficientas; G_B – gravitacijos turbulentiškumo koeficientas; ν_T – turbulentinė kinematinė klampa, m^2/s ; Pr_k – Prandtlio skaičius, esamomis t. k. e. sąlygomis; ∇ – Laplaso operatorius; ε – kinetinės energijos disipacijos greitis, $\text{J/kg}\cdot\text{s}$; $c_{\varepsilon 3}$ – vienalyčio turbulentiškumo koeficientas esant staigiam suspaudimui; $c_{\varepsilon 2}$ – srauto turbulentiškumo slopimo koeficientas; $c_{\varepsilon 1}$ – turbulentinio tekėjimo pasienio sluoksnyje kitimo koeficientas; $c_{\varepsilon 0}$ – nespūdaus fluido gravitacinio maišymosi koeficientas; $\operatorname{Pr}_\varepsilon$ – Prandtlio skaičius esamomis kinetinės energijos disipacijos sąlygomis.

Standartinis k – ε (2.9 ir 2.10 lygtys) ir k – ε *RNG* (2.11 ir 2.12 lygtys) modeliai išreikšti dalinių išvestinių pavidale (Ansys, 2017):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f k u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \\ & + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M + S_k; \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon; \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f k u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \\ & + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M + S_k; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - \\ - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (2.12)$$

čia G_k – t. k. e. kitimas dėl vidutinio greičio gradiento, kuris pagal Businessko hipotezę lygus $G_k = \mu_t S^2$; μ_t – turbulentinė dinaminė klampa; S – deformacijų

tenzorius; G_b – t. k. e. kitimas dėl plūdrumo, kuris lygus $G_b = \beta_{t.p.} g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$;

$\beta_{t.p.}$ – temperatūros plėtimosi koeficientas; Pr_t – energijos turbulencijos Prandtlio skaičius; g_i – gravitacijos vektorius i kryptimi; Y_M – fluído greičio pasiskirstymas dėl persikėlimo erdvėje esant turbulentiniam suspaudimui, kuris lygus $Y_M = 2\rho_f \varepsilon M_t^2$; M_t – turbulentiškumo macho skaičius; koeficientas; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – pastoviosios; σ_k ir σ_ε – turbulentiškumo Prandtlio skaičius atitinkamai k ir ε kintamiesiems. S_k ir S_ε – vartotoju nustatomi kintamieji.

Kitaip negu k – ε klamos modelyje patobulintoje modifikacijoje k – ε RNG pasienio sluoksnio funkcijos netaikomos, modelis taikomas visai tekėjimo sričiai. Patobulinto klamos modelio taikymui dažniausiai reikalingas labiau detalus skaičiavimo tinklelis – ir ne tik pasienio sluoksnyje, o visose srityse, kur fluído tekėjimas pasižymi mažėjančiu turbulentiškumu, t. y. Reinoldso skaičius sąlyginai nėra didelis. Kartais pakanka taikyti standartinį k – ε modelį, norint pasiekti skaičiavimuose mažas priartėjimo paklaidas. Alternatyva gali būti automatinio modelio parinkimas pasienio sluoksnyje ir nuoseklus skaičiavimo tinklelio detalumas šiose zonose. Taikant patobulintą modelį, gali būti pasiektas didesnis dujų srauto atitraukimo ir keletu dujų srautų sąveikos modeliavimo rezultatų tikslumas.

Taikant k – ω modelį, yra sprendžiama mokslininko D. C. Vilko (2008) išvesta dviejų nelineinių difuzijos lygčių sistema – t. k. e. ir kinetinės energijos disipacijos lyginamojo greičio, kurį sudaro turbulentinės klamos ir šlyties įtempimų pernašos lygtys. Šis klamos modelis plačiai taikomas esant fluidų srautams, kai Reinoldso skaičius, spūdimas ir nutraukimas nuo pasienio sluoksnio yra mažas.

Standartinis k – ω (2.13 ir 2.14 lygtys) ir k – ω SST (angl. *shear stress transport*) (2.13 ir 2.15 lygtys) modeliai išreikšti dalinių išvestinių pavidalu (Menter, 1994):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega; \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad (2.15)$$

čia G_k – t. k. e. kitimas dėl vidutinio greičio gradiento; G_ω – kintamasis dėl ω pokyčio; Γ_k ir Γ_ω – efektyvios difuzijos kintamieji atitinkamai k ir ω , kur

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad \text{ir} \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}; \quad Y_k \text{ ir } Y_\omega - \text{turbulentiškumo sukeltos atitinkamai } k$$

ir ω disipacijos kintamieji; S_k ir S_ω – vartotojų nustatomi kintamieji; D_ω – difuzijos kintamasis, kuris lygus $D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$; F_1 – fluído maišymosi

funkcija.

SST – modelis – tai k - ε ir k - ω turbulentiškumo modelių derinys: laisvam fluído tekėjimui įvertinti yra taikomas k - ε modelis, o pasienio sluoksnio sritims – k - ω modelio lygtys. Skaičiavimo tinklelio detalumas yra reikalingas kaip ir k - ω ir k - ε *RNG* modelių atvejais.

Mokslininkas F. R. Menteris (1994; 2009) atlikęs tyrimus nustatė, kad k - ω *SST* turbulentinio klampos modelio taikymas yra tikslesnis ir patikimesnis atliekant tyrimus platesnei fluído srautų klasei (ypač tada, kai modelyje aptinkami atvirkštiniai slėgio gradiento srautai, aerodinaminiai paviršiai, staigios smūgio bangos) nei standartinis *SST* bei kiti *SST* modeliai.

Atliekant skaitinio modelio skaičiavimus lygtys yra sprendžiamos baigtinių tūrių metodu. Kietųjų dalelių judėjimas yra apskaičiuojamas, vertinant judesio perdavimą tarp fazių ir tarp jų veikiančias plūdrumo jėgas. Slėgio gradientas modeliavimo programos skaičiavimuose automatiškai vertinamas tuo atveju, kai šios jėgos vertė yra lygi arba didesnė nei kietųjų dalelių tankis.

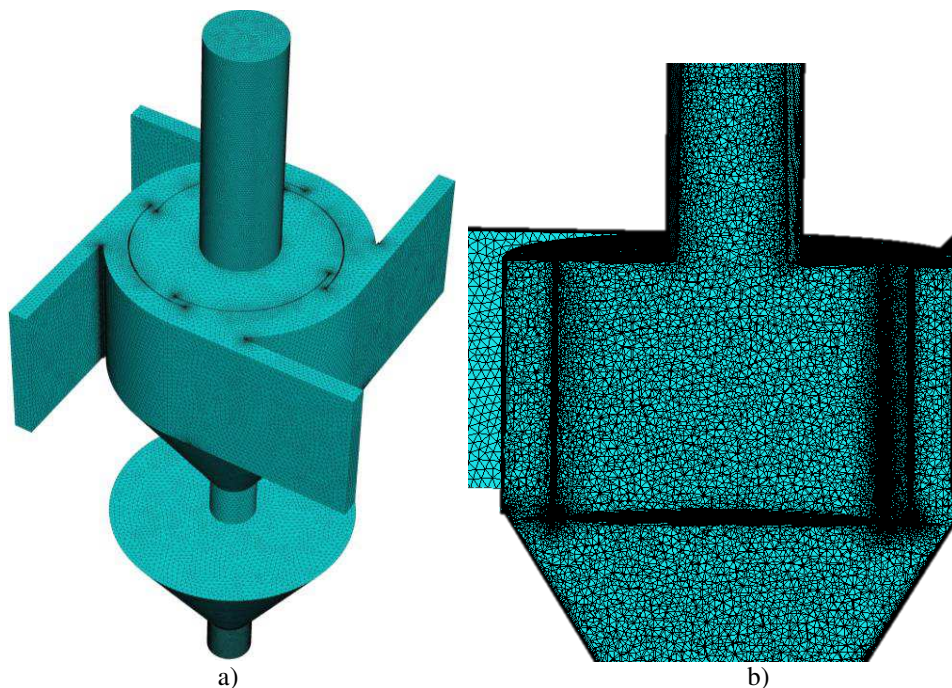
Skaitinio modelio rezultatų patikimumui ir tikslumui pasiekti turi būti taikomas detalus ir reprezentatyvus skaičiavimo tinklelis. ANSYS CFD Fluent programiniame pakete buvo suformuoti trys skiriamosios gebos daugiakanalio ciklono modelio tinkleliai. Tinklelį sudaro tetraedrai, kurių kiekvieno briaunos ilgis ne didesnis nei 20 mm, o atstumas tarp elementų – ne mažesnis nei 50 μm . Pasienio sluoksnio aukštis lygus 0,1 mm. Pasienio zonos tinklelį sudaro 8 sluoksniai. Žemo detalumo skaičiavimo tinklelis sudarytas iš 7 760 255, vidutinės – 8 880 597 elementų (2.14 pav.), aukštos – 9 917 267 elementų.

Patobulinto daugiakanalio ciklono modeliui buvo parinktas vidutinio detalumo skaičiavimo tinklelis. Pastarasis atvejis buvo nustatytas kaip labiausiai tinkamas remiantis atliktais tyrimais su daugiakanalio ciklono geometrija.

Skirtingomis ašių kryptimis patobulinto daugiakanalio ciklono modelio ilgis yra: $x - 1600$ mm; $y - 1600$ mm; $z - 3400$ mm.

Sudarant skaitinį modelį buvo atsižvelgta į patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais konstrukcijos paviršiaus šiurkštumą, kuris pasireiškia adhezijos ir autohezijos metu judant agresyviųjų užterštų kietosiomis dalelėmis dujų srautui.

Paviršiaus šiurkštumas modelyje yra vertinamas kaip veiksnys, kuris turi įtakos slėgio pokyčiams bei šilumos ir masės mainams pasienio sluoksnyje. Buvo pasirinktas pakeistos sienos dėsnis dėl šiurkštumo, kuris yra taikomas turbulentiui srautui judėjimui apribotoje sienelėmis erdvėje, kurių šiurkštumas yra reikšmingas. Šiurkštumo laipsnį nulemia glotnumo koeficientas K_S^+ , kuris esant glotniam paviršiui yra ne didesnis nei 2,25 (I atvejis). Esant pusiau glotniam paviršiui, jo vertė gali būti lygi 2,25–90 (II atvejis). Didelio šiurkštumo paviršiaus koeficiento vertė didesnė nei 90 (III atvejis).



2.14 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais sudaryta geometrija ir skaičiavimo tinklelis: a) bendras objekto tinklelio vaizdas; b) išgaubto separavimo kameros dugno ir ketvirtadaliaus žiedo formos elementų sutankintas tinklelis (šaltinis: autorius)

Fig. 2.14. Geometry and mesh of newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets: a) a main view of the mesh of object; b) inflated boundary layer of the convex bottom of separation chamber and the quarter-ring-shaped elements (source: author)

Paviršiaus glotnumas neturi įtakos, esant I atvejui, tačiau jo įtaka sparčiai didėja, esant II, ir ypač III atvejams. Esant šioms atvejams, programiniame pakete yra taikomos matematinės išraiškos kiekvienam atvejui (2.16) išraiška:

$$\begin{aligned} \Delta B_{p.s.} &= 0, \text{ kai } K_S^+ \leq 2,25; \\ \Delta B_{p.s.} &= \frac{1}{k} \ln \left[\frac{K_S^+ - 2,25}{87,75} + C_S K_S^+ \right] \cdot \sin \left\{ 0,4258 \left(\ln K_S^+ - 0,811 \right) \right\}, \\ &\text{kai } 2,25 < K_S^+ \leq 90; \\ \Delta B_{p.s.} &= \frac{1}{k} \ln \left[1 + C_S K_S^+ \right], \text{ kai } K_S^+ > 90, \end{aligned} \quad (2.16)$$

čia $\Delta B_{p.s.}$ – paviršiaus šiurkštumo kintamasis, kuris turi įtakos fluido ir kietųjų dalelių trajektorijai; C_S – šiurkštumo koeficientas, kuris nulemia šiurkštumo formą, smulkioms kietosioms dalelėms yra lygus 0,3–0,5; k – turbulentinė kinetinė energija, J; K_S^+ – ekvivalentinis paviršiaus šiurkštumo aukštis, m.

Agresyviųjų dujų srauto judėjimo procesų pokyčiams nustatyti buvo pasirinktas atvejis, kai patobulinto daugiakanalio ciklono vidinių paviršių šiurkštumo aukštis siekė 0,02 m. Pagal nutylėjimą programa naudoja C_S koeficientą, kuris lygus 0,5, remiantis turbulencijos modeliu pagal Nikuradse sukurtą metodiką. Taikant šią metodiką yra daroma prielaida, kad sienelių šiurkštumas yra tolygus. Šio modelio koeficientai gali būti koreguojami, kai yra analizuojamas stambių grūdelių nusėdimas ant sienelių arba kai grūdelių forma turi netaisyklingos formos stambių briaunų.

Patobulintame daugiakanaliame ciklone dujų srauto greičio ir slėgių aerodinaminiam pasipriešinimui įvertinti agresyviųjų dujų srauto bendro valymo efektyvumo ir $KD_{2,5}$ ir KD_{10} šalinimo efektyvumo nustatymui gauti duomenys buvo sisteminti ir vertinti statistiniais metodais. Tyrimų metu kiekvienas mėginys buvo imtas ir tirtas ne mažiau nei 3 kartus. Matavimo taškai tokiems parametrų, kaip dujų srauto greitis ir slėgis, temperatūra, santykinis drėgnis, buvo išdėstyti tinklo principu per visą įkrovos skerspjūvio plotą. Kiekviename taške matuota ne mažiau nei po 3 kartus. Detali statistinio duomenų apdorojimo metodika pateikta A priede.

2.9. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudaryta patobulinto daugiakanalio ciklono parametrų teorinių tyrimų, įvertinant agresyviųjų dujų srautą, metodika, kuri gali būti taikoma garų-dujų srauto tankiui, klampai, veikiančioms mechaninėms jėgoms, aerodinaminiais parametrų nustatyti. Agresyviųjų dujų srauto ir jų kraštutinių atvejų įtaka patobulinto daugiakanalio ciklono darbui vertinama, atsižvelgiant į temperatūros

ir santykinio drėgnio parametrus dujų sraute. Atrinktos labiausiai reikšmingos daugiakanaliam ciklono darbui sudarytos specialiai pritaikytos išraiškos agresyviųjų dujų srauto tankiui ir greičiui apskaičiuoti.

2. Sudaryta agresyviųjų dujų srauto imitavimo metodika būdinga technologiniams procesams ir pasiūlyta ją taikyti, atsižvelgiant į skirtingą vidutinį greitį patobulintame daugiakanaliame ciklone, siekiant nustatyti skirtingos prigimties smulkiadisversijų kietųjų dalelių adheziją įrenginyje.

3. Atsižvelgiant į metodines rekomendacijas, kurios skirtos plieno paviršiaus glotnumui nustatyti, parinkta tyrimo metodika, siekiant palyginti įvairių metalų ir lydinių (cinkuotos skardos, nerūdijančio plieno ir juodojo metalo) paviršiaus glotnumą, skirtingai apdorojus jų paviršius – neapdorojus (palyginamasis), šlifuojant smėliasrove bei padengus karščiui ir dilimui atspariu laku. Paviršiaus glotnumas vertinamas pagal profilio nuokrypio rodiklius, pritaikant paviršiaus šiurkštumo charakteristikų nustatymui, taikant abrazyvo srauto apdorojimą, standartą.

4. Sudarytos aerodinaminių (dujų srauto greičio ir slėgio) parametrų bei bendro valymo efektyvumo ir $KD_{2,5}$ ir KD_{10} kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų metodikos, kurių tikslas – nustatyti didžiausią SDKD šalinimo efektyvumą patobulintame daugiakanaliame ciklone su antriniais dujų įtekėjimais, pritaikant standartų ir normatyvinių metodų principus. Šiam tyrimo tikslui pasiekti atsižvelgiama į optimalius patobulinto daugiakanalio ciklono veikimo parametrus, taikant skirtingos prigimties ir fizikinių parametrų smulkiadisverses kietąsias daleles.

5. Kietųjų dalelių dinamikos ir dujų judėjimo procesų skaitiniam modeliavimui atlikti parinktas ANSYS: Fluent paprogramis ir pasiūlyti klamos modeliai. Sudarytas optimalus agresyviųjų dujų srauto valymo proceso nuo kietųjų dalelių patobulintame daugiakanaliame ciklone modelis, kurio atliktų tyrimų rezultatai vertinami atsižvelgiant į skirtingo detalumo tinkelių taikymą bei klamos modelių parametrų parinktis.

Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto dinaminių parametrų bei smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai ir jų analizė

Patobulintam daugiakanaliam ciklonui sukurti bei taikyti šį įrenginį kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų šalinti dirbtiniu būdu buvo sukurtas kontroliuojamų savybių agresyviųjų dujų srautas, šio srauto parametrai bei skirtingos prigimtios kietųjų dalelių adhezijos reiškiniai ciklonuose. Kietųjų dalelių adhezijai turi įtakos paviršių, su kuriais kontaktuoja agresyviųjų dujų srautas, glotnumas. Tyrimuose išanalizuoti skirtingų paviršių glotnumo rodikliai. Atlikti charakteringų agresyviųjų dujų srauto parametrų teoriniai tyrimai bei pasiūlytos supaprastintos išraiškos parametrams apskaičiuoti. Atliktais aerodinaminių parametrų tyrimais nustatyti optimalūs patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais taikymo atvejai. Tyrimais nustatyta bendro valymo efektyvumo

priklausomybė nuo vidutinio dujų srauto greičio ciklono kanaluose, praleidus skirtingo tūrio agresyviąsias dujas.

Skyriaus tematika paskelbta septyniolika autoriaus mokslinių straipsnių (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2018; Baltrėnas, Pranskevičius & Chlebnikovas, 2014; Baltrėnas, Vasarevičius, Kazlauskienė & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas and Baltrėnas, 2017a, 2017b; Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017; Danilenkaitė, Chlebnikovas & Vaitiekūnas, 2013; Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014; Vaitiekūnas, Petraitis & Chlebnikovas, 2014). Gauti autoriaus Europos ir LR patentai (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2019; Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2013, 2017).

3.1. Patobulinto daugiakanalio ciklono teorinių tyrimų, įvertinant agresyviųjų dujų srauto fizikinius parametrus, rezultatai ir jų analizė

Daugiakanalių ciklonų veikimo principas – SDKD nusodinamos veikiant išcentrinėms jėgoms ir, papildomai, filtravimu zonoje, kur susiduria grįžtantis (periferinis) ir naujai atitekantis (tranzitinis) dujų srautai. Filtravimo zonose kietosios dalelės sulaikomos, nusodinamos ir nukreipiamos į plyšius separavimo kameros dugne, taip pat SDKD yra atskiriamos iš dujų srauto, vyksta filtravimas.

Teoriniais tyrimais siekiama nustatyti agresyviųjų dujų srauto charakteristikų – dinaminės ir kinematinės klampos, rasos taško temperatūros, sauso bei drėgno dujų srauto tankio kitimą bei santykinio drėgnio priklausomybę nuo temperatūros esant kraštutiniams agresyviųjų dujų srauto atvejams. Agresyviųjų dujų srauto greitis daugiakanalio ciklono pirmajame kanale gali kisti priklausomai nuo agresyviųjų dujų charakteristikų, todėl jas būtina įvertinti. Pagal atliktą jautrumo analizę (pasirinkti atvejai, kurių koreliacijos koeficientas yra didžiausias), sudarytos matematinės išraiškos agresyviųjų dujų srauto greičiui bei tankiui apskaičiuoti. Atlikti išcentrinės, pasipriešinimo, gravitacijos, kapiliarinių ir elektrinių jėgų teoriniai skaičiavimai bei teoriškai įvertinti pasireiškiantys adhezijos (kietosios dalelės sąveikos jėga su vertikalia daugiakanalio ciklono sienele) ir filtravimo (periferinio/tranzitinio srautų susidurimo zonoje) reiškiniai. Ištirtas SDKD šalinimo efektyvumo kitimas daugiakanaliame ciklone agresyviųjų dujų sraute bei jam esant papildomai užterštam cheminiais junginiais (anglies monoksidas, acetonas) sudarytos matematinės išraiškos daugiakanalio ciklono valymo efektyvumui apskaičiuoti.

Pirmajame SDKD nuosėdų formavimosi etape susidaro iš smulkių kietųjų dalelių sudaryti monosluoksniai, kurie išlygina paviršių, ant kurių formuojasi

laminarinio pobūdžio dujų srauto tekėjimas, kuris pasižymi nedideliu disperguojančiu poveikiu nuosėdoms. Nuosėdoms kaupiantis, į šį sluoksnį gali įsiterpti stambesnės kietosios dalelės, kurios sutankina šiuos darinius (Sobolev et al., 2011).

Didelių gabaritų daugiakanaliai ciklonai, pasižymi galimybe nusodinti ir smulkias kietąsias daleles, kadangi arti paviršių veikia papildomos inercijos jėgos, kurios atsiranda kietųjų dalelių turbulentinės pernašos metu, esant dideliems kietųjų dalelių pulsacinių greičių gradientams, nukreiptiems link paviršiaus. Dideliuose ciklonuose dėl mažesnių išcentrinų pagrečių, arti ribojančių srautus paviršių aglomeratų, kuriuos sudaro smulkiosios kietosios dalelės, prilipimas yra mažiau tikėtinas (Gong and Wang, 2004).

Valant agresyviųjų dujų srautą, dėl aukštos temperatūros ir didelio drėgnio pasikeičia aerodinaminiai (dujų srauto greitis) bei fizikiniai (klampa) parametrai, pakinta ciklono valymo efektyvumas. Esant šioms pokyčiams, įvyksta dujų srauto įsotinimas drėgme bei padidėja SDKD sulipimas, adhezijos jėgos su vidiniais daugiakanalio ciklono elementais ir SDKD autohezijos jėgos tarpusavyje padidėja. Visi pastarieji faktoriai sudaro dujų–garų aplinką ir užkemša daugiakanalio ciklono separavimo kameroje esančius segmentinius žiedinius plyšius bei ketvirtadaliai žiedo formos elementuose esančias angas, dėl to įrenginys toliau negali būti eksploatuojamas. Įtekant užterštam dujų srautui į daugiakanalio ciklono separavimo kamerą, smulkių kietųjų dalelių aglomeratai konstrukcijos išlinkimuose patenka ant vertikalių sienelių ir prilimpa prie jų. Šiuo atveju, priklausomai nuo šių aglomeratų masės ir jų koordinatų išdėstymo daugiakanalio ciklono įtekėjimo skerspjūvyje, SDKD prilipimas bus netolygus, todėl ant paviršiaus susidarys nelygumai.

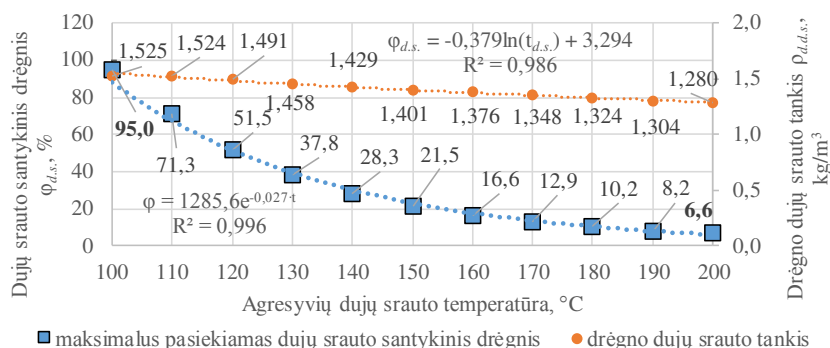
Įvertinus agresyviųjų dujų charakteristikų priklausomybes, buvo sudarytos pritaikytos teorinės supaprastintos išraiškos agresyviųjų dujų srauto tankiui bei klampai apskaičiuoti. Šiems parametrų įvertinti buvo ištirtos į išraiškas įeinančių parametrų, tokių kaip sauso dujų, įsotintų garų ir vandens garų srauto parcialiniai slėgiai, vertės. Pastarosios buvo parinktos atsižvelgiant į agresyviųjų dujų srauto, patenkančio į daugiakanalį cikloną, charakteristikas esant kraštutiniams atvejams, t. y. esant didžiausiai galimai temperatūrai ir drėgniui.

Teoriniuose tyrimuose daroma prielaida, kad drėgnas dujų/garų srautas yra laikomas idealiųjų dujų mišiniu, kai kiekvieno iš komponentų tankių suma sudaro bendrą mišinio tankį. Tokiu būdu nustatomo tankio paklaida yra mažesnė nei 0,2 %, kai temperatūros kinta nuo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taip pat yra priimta prielaida, kad dujų srauto santykinis drėgnis yra atvirkščiai proporcingas temperatūrai.

Moksliniais tyrimais nustatyta, kad drėgno agresyviųjų dujų srauto tankis yra tiesiogiai proporcingas sausų dujų ir vandens garų slėgiams bei atvirkščiai proporcingas temperatūrai (Lawrence, 2005).

Sauso ir drėgno dujų srauto tankiai yra apskaičiuoti agresyviųjų dujų srauto atvejams, kai temperatūra kito 0–200 °C intervale, temperatūros pokyčio žingsnis buvo 25 °C. Drėgno dujų srauto tankiui apskaičiuoti didžiausias galimas santykinis drėgnis buvo numatytas 95 %. Atvejais, kai drėgno dujų srauto temperatūra buvo didesnė nei 100 °C, dujų srauto santykinis drėgnis buvo apskaičiuotas atsižvelgiant į atmosferos ir įsotintų vandens garų slėgių santykį. Daroma prielaida, kad daugiakanaliame ciklone slėgis yra pastovus ir lygus atmosferos slėgiui. Teorinių tyrimų rezultatai pateikti 3.1 paveiksle.

Esant neaukštai dujų srauto temperatūrai, t. y. 25 °C ir 50 °C, sausų dujų srauto tankis sumažėja atitinkamai 9 % ir 18 %, lyginant su tankiu, esant normalioms sąlygoms (0 °C), tuo tarpu drėgno dujų srauto – 7 % ir 11 %. Įsotintų garų parcialinis slėgis pakitus temperatūrai nuo 25 °C iki 50 °C, padidėjo daugiau nei 3,9 karto. Esant 100 °C dujų srauto temperatūrai ir 95 % santykiniam drėgniui, drėgno dujų srauto tankis lygus 1,525 kg/m³, o sausų dujų srauto – 0,945 kg/m³.



3.1 pav. Teoriškai nustatytos didžiausio dujų srauto santykinio drėgnio ir drėgno $\rho_{d.s.}$ dujų srauto tankio priklausomybės nuo agresyviųjų dujų srauto temperatūros (šaltinis: autorius)

Fig. 3.1. The theoretical highest relative humidity and wet ($\rho_{d.s.}$) gas flow density dependences on aggressive gas flow temperature (source: author)

Dujų srauto temperatūrai kylant virš 101,7 °C, didžiausias galimas santykinis drėgnis yra mažesnis už 95 %. Eksponentiškai didėjantis įsotintų vandens garų slėgis turi įtakos santykinio drėgnio ir drėgno dujų srauto tankio mažėjimui. Esant 120 °C temperatūrai, santykinis drėgnis sumažėja iki 51,5 % vertės, o esant 140 °C ir 160 °C atvejams santykinis drėgnis atitinkamai lygus 28,3 % ir 16,6 %. Įsotintų vandens garų slėgis, pakilus temperatūrai nuo 100 °C iki 160 °C, padidėja 6,1 karto ir siekia 611,7 kPa. Sauso dujų srauto tankis, esant 150–200 °C temperatūrai, toliau tolygiai mažėja ir 200 °C atveju tampa lygus 0,745 kg/m³. Drėgno

dujų srauto tankis 160–180 °C temperatūrų intervale siekė 1,376–1,324 kg/m³, tuo tarpu santykinis drėgnis esant 180 °C yra lygus 10,2 %, 190 °C – 8,2 %. Drėgno dujų srauto santykinis drėgnis esant 200 °C agresyviųjų dujų srauto temperatūrai siekia tik 6,6 %, kai jo tankis lygus 1,280 kg/m³, o teoriškai nustatytas įsotintų vandens garų slėgis padidėja iki 1529,6 kPa. Tokį slėgį pasiekti realiomis sąlygomis yra įmanoma, tačiau tam tikslui yra būtinos daugiapakopės šildymo sistemos bei ypač atsparios aukštam slėgiui talpos. Taip pat kartu su šildymo sistema turi būti naudojamas deaeratorius, kurio darbinis slėgis siekia 1400–1800 kPa.

Kai dujų srauto temperatūra pakyla virš 100 °C, pasireiškia panašios drėgno ir sauso dujų srauto tankių kitimo tendencijos. Drėgno dujų srauto tankis, kylant temperatūrai kas 10 °C, sumažėja apytiksliai 1 %, o sauso dujų srauto – 2 %. Įsotintų garų parcialinis slėgis, kylant temperatūrai, ypač sparčiai didėja, kitimas artimas eksponentinei priklausomybei, t. y. pakilus temperatūrai nuo 100 °C iki 200 °C, slėgis padidėjo 15,2 karto.

Remiantis M. G. Lawrence'o (2005) ir J. M. Wallace'o and P. V. Hobbso (2006) darbais, nustatyta, kad kylant agresyviųjų dujų srauto temperatūrai, santykinis drėgnis mažėja pagal eksponentinę priklausomybę. Teoriniuose skaičiavimuose buvo remtasi prielaida, kad yra išlaikomas kritinis 95 % santykinis drėgnis, kai temperatūra siekia 101,7 °C, tuo metu įsotintų vandens garų slėgis lygus 106,7 kPa.

Literatūroje yra rasta informacijos apie agresyviųjų dujų srauto santykinio drėgno kitimą esant žemai (iki 50 °C) temperatūrai (The Humidity/Moisture..., 2011). Daugiakanalis ciklonas gali būti eksploatuojamas esant temperatūrai virš 100 °C, todėl esamų duomenų nepakanka. Buvo atlikti teoriniai tyrimai, kurių rezultatai leido sudaryti apytikslią matematinę išraišką (3.1 formulė), nusakančią agresyviųjų dujų srauto santykinio drėgno kitimą esant aukštesnei nei 100 °C dujų srauto temperatūrai:

$$\varphi_{d.s.} = 1285,6 \cdot e^{-0,027 \cdot t_{d.s.}}, \%, \quad (3.1)$$

čia $\varphi_{d.s.}$ – dujų srauto santykinis drėgnis, %; $t_{d.s.}$ – dujų srauto temperatūra, °C, $e = 2,718$.

Ypatingos sąlygos turi įtakos dujų srauto tankiui, kuris glaudžiai susijęs su klampa bei sąlygoja srauto judėjimo pobūdį ciklono kanaluose. Teoriniam skaičiavimui buvo pasirinktas supaprastintas atvejis, kai dujų srautą sudarė oro ir vandens garų mišinys.

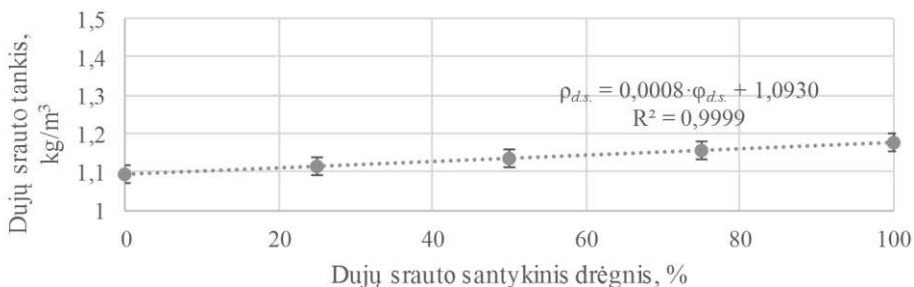
Agresyviųjų dujų srauto tankio teorinei išraiškai sudaryti buvo atlikti teoriniai tyrimai. Pagal atliktą jautrumą analizę nustatyta, kad mažiausia vidutinė paklaida buvo gauta tarp agresyviųjų dujų srauto tankio ir santykinio drėgno parametrų, esant 50 °C temperatūrai, kuri buvo lygi $\pm 0,24$ °C. Remiantis gautais rezultatais,

2.1 formulė gali būti specialiai pritaikyta paprastesne išraiška (3.2 formulė) agresyviųjų dujų srauto tankiui apskaičiuoti:

$$\rho_{d.s.} = x_1 \cdot \varphi_{d.s.} + y_1, \quad (3.2)$$

kai $t_{d.s.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_1 = 0,0002$, $y_1 = 1,2048$; kai $t_{d.s.} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_1 = 0,0008$, $y_1 = 1,093$; kai $t_{d.s.} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_1 = 0,0061$, $y_1 = 0,946$; kai $t_{d.s.} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_1 = 0,0809$, $y_1 = 0,7463$; čia $\rho_{d.s.}$ – dujų srauto tankis, kg/m^3 ; $\varphi_{d.s.}$ – dujų srauto santykinis drėgnis, %; ši išraiška gali būti taikoma, kai dujų srauto temperatūra yra pastovi, $t_{d.s.} = \text{const}$, $^{\circ}\text{C}$, x_1 – tankio pirmasis kintamasis; y_1 – tankio antrasis kintamasis.

Skaičiavimo tikslumas buvo nustatytas taikant skirtingo dujų srauto santykinio drėgnio vertes. Nuokrypis taikomai 3.2 formulei siekė nuo $-0,22\%$ (kai $\varphi_{d.s.} = 95\%$) iki $+0,02\%$ (kai $\varphi_{d.s.} = 0\%$).



3.2 pav. Agresyviųjų dujų srauto tankio priklausomybė nuo dujų santykinio drėgnio, esant $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai (šaltinis: autorius)

Fig. 3.2. Dependence of aggressive gas density on gas flow relative humidity at temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (source: author)

Didžiausias agresyviųjų dujų srauto tankio vertės nuokrypis lygus $0,22\%$, todėl galima teigti, kad tikslumas, taikant 3.2 išraišką dujų tankiui apskaičiuoti, yra pakankamas.

Didelę reikšmę agresyviųjų dujų srauto tekėjimui turi dujų (oro) dinaminė ir kinematinė klampa. Kadangi kinematinė klampa yra tiesiogiai proporcinga dinaminei klampai, todėl taikomos tokios sąryšių lygtys, kurios įvertina temperatūros ir tankio parametrus. Remiantis esamais molekulinės fizikos ir termodinamikos dėsniais yra žinoma, kad agresyviųjų dujų srauto dinaminė klampa kinta tik keičiantis agresyviųjų dujų srauto temperatūrai, o kinematinė klampa – agresyviųjų dujų srauto temperatūrai ir tankiui (Menter, 1994).

Agresyviųjų dujų srauto klamos tyrimui, pirmiausia, palyginimui buvo apskaičiuotos vertės, esant normaliosioms sąlygoms, t. y. esant $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir 0% santykiniam drėgniui, kai slėgis buvo lygus $101,3\text{ kPa}$. Pastaruoju atveju dinaminė klampa lygi $17,17\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, o kinematinė – $13,28\text{ mm}^2/\text{s}$.

Eksploatuojant daugiakanalį cikloną, dažni atvejai, kai agresyviųjų dujų srauto temperatūra ir santykinis drėgnis kinta. Tam tikslui buvo atliktas teorinis tyrimas, kai santykinis drėgnis siekė 0 %, 50 % ir 95 %, kuris nekito, tuo tarpu temperatūra kito 20–200 °C intervale.

Kaip jau buvo minėta, dinaminė klampa priklauso tik nuo agresyviųjų dujų srauto temperatūros, todėl šis parametras vertinamas tik esant skirtingoms temperatūroms. Tokiu būdu, esant įprastoms sąlygoms (kai dujų srauto temperatūra lygi 20 °C) ir 0–95 % santykiniam drėgniui, klampa lygi 18,02 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Agresyviųjų dujų srauto teoriniais tyrimais nustatyta, kad esant 50 °C temperatūrai bei 95 % santykiniam drėgniui, drėgno dujų srauto tankis lygus 1,172 kg/m³. Šiuo atveju esant agresyviųjų dujų srautui dinaminė klampa lygi 19,26 Pa·s, o kinematinė – 16,44 mm²/s, rasos taško temperatūra siekė 49 °C.

Agresyviųjų dujų srauto sąlygos pasitaiko šiluminėse katilinėse, kai iš biokuro katilo išeinančių dujų srautas praeina pro aušintuvus (ekonomaizerius). Tokiu atveju dujų temperatūra siekia nuo 50 °C iki 100 °C, o agresyviųjų dujų srauto dinaminė klampa yra didesnė nei esant įpastoms sąlygoms atitinkamai 7 % ir 18 %. Esant 100 °C temperatūrai, didžiausias galimas santykinis drėgnis išlieka 95 %, dujų dinaminė klampa lygi 21,25 Pa·s, o kinematinė – 13,94 mm²/s. Rasos taško temperatūra nežymiai skiriasi nuo dujų srauto temperatūros ir lygi 98,6 °C, todėl galima teigti, kad šiuo atveju dujų srautas yra persotintas garais bei kondensacija vyksta net ant nežymiai ataušusių paviršių.

Teoriniame tyrime, taikant aukščiausias temperatūrų vertes, t. y. 150 °C ir 200 °C – dinaminė klampa atitinkamai buvo gauta lygi 23,16 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ir 24,99 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$, o kinematinė – nuo 16,53 mm²/s iki 19,52 mm²/s. Rasos taško temperatūra nežymiai skiriasi tarp pastarųjų atvejų ir lygi 100,8 °C ir 101,7 °C. Esant 150 °C ir 200 °C temperatūroms rasos taško vertė viršija 100 °C, tai termodinamiškai nėra įmanoma, ir liudija apie persotintą aplinką, todėl tolesnis kitimas nėra vertinamas. Gamyboje pastarosios dujų srauto temperatūros pasitaiko dujų–dūmų srauto dūmtakiuose po degimo procesų (katilų, autoklavų), kai santykinis drėgnis gali siekti iki 10 % – po katilo, arba 5–30 % po įvairaus džiovinimo krosnių, kai panaudojamos drėgnos žaliavos ir (arba) procese įpurškiami reagentai ar specialūs tirpalai, reikalingi technologiniam procesui.

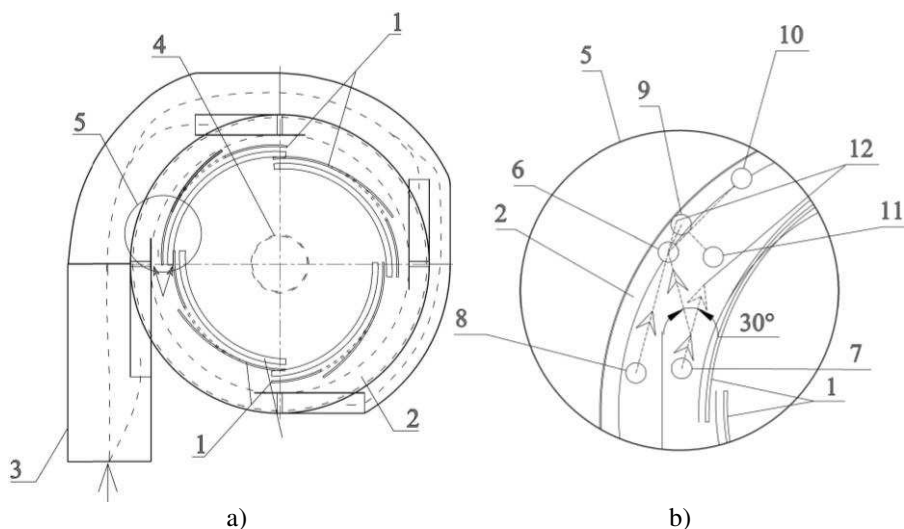
Agresyviųjų dujų srauto kinematinė klampa atvirkščiai proporcinga santykiniam drėgniui, kai temperatūra kinta 50–100 °C intervale. Išimtimi galima laikyti atvejus, kai santykinis drėgnis yra 0 %, kai kinematinė klampa tiesiogiai proporcinga dujų srauto temperatūrai. Kita svarbi išimtis – tai 50–100 °C agresyviųjų dujų srautas. Kinematinė klampa, esant 50 % santykiniam drėgniui, didėja kylant dujų srauto temperatūrai iki 100 °C, toliau klampa mažėja. Tai galima sieti su vandens garavimo procesais, kai vanduo pereina į dujinę fazę, bei daroma prielaida, kad tarp kietųjų dalelių sumažėja trinties jėgos. Tuo tarpu, esant 95 % agresyviųjų dujų srauto santykiniam drėgniui, kritinė temperatūra yra 61 °C, kurią

pasiekus kinematinę klampą pradeda mažėti, kylant temperatūrai. Galima prieiti prie išvados, kad esant ypatingai drėgnam dujų srautui garavimo procesai vyksta intensyviau, todėl trinties jėgų sumažėjimas patiriamas esant mažesnei nei vandens virimo temperatūrai, t. y. 100 °C. Esant 20 °C temperatūrai, kinematinė klampa lygi 14,96 mm²/s, kai santykinis drėgnis buvo 0 %. Esant 50 % ir 95 % agresyviųjų dujų srauto santykiniam drėgniui, vertės sumažėjo atitinkamai 0,7 % ir 1,3 %. Esant aukštesnėms temperatūroms – 50 °C ir 100 °C, klampa reikšmingai padidėjo 1,1–1,2 karto, ir esant 0 %, 50 %, 95 % drėgniui buvo lygi 17,62 mm²/s, 16,98 mm²/s ir 16,44 mm²/s. Pasiekiant išimčiai tenkančius temperatūrų intervalus nustatyta, kad sauso dujų srauto kinematinė klampa lygi 22,45 mm²/s, o esant 50 % ir 95 % santykiniam drėgniui – 16,99 mm²/s ir 13,94 mm²/s. Išanalizavus 150 °C ir 200 °C agresyviųjų dujų srauto kinematinę klampą buvo nustatyta, kad esant 0 % drėgniui vertės didėjo vidutiniškai 1,22 karto kas 50 °C, ir ties 200 °C buvo lygi 33,49 mm²/s. Esant 200 °C temperatūrai ir jai atitinkančiam 6,6 % santykiniam drėgniui, kinematinė klampa padidėjo 40 %, palyginus su 100 °C atveju (kai santykinis drėgnis siekė 95 %).

Agresyviųjų dujų srauto judėjimas patobulintame daugiakanaliame ciklone apima sudėtingą aerodinaminių bei mechaninių procesų bei reiškinių visumą. Šiems procesams vykstant, pasireiškia periferinio ir tranzitinio srautų tarpusavio sąveika (filtravimas), atsiranda SDKD veikiančios savo dydžiu labiausiai reikšmingos išcentrinė, gravitacijos ir adhezijos jėgos, taip pat pasipriešinimo, kapiliarinė bei elektrinė. Šių procesų vertinimas bei jų reikšmė patobulinto daugiakanalio ciklono darbui yra svarbus SDKD šalinimo iš agresyviųjų dujų srauto teorinio tyrimo uždavinys.

Teoriniuose tyrimuose yra analizuojami skirtingas agresyviųjų dujų srautas ir dujų srauto užteršto SDKD parametrai patobulintame daugiakanaliame ciklone, kurio principinė schema pateikta 3.3 paveiksle.

Kietosios dalelės, patekusios kartu su drėgnu aukštos temperatūros dujų srautu, pasiskirsto ciklono kanaluose. Kietąsias daleles veikiančias jėgas tikslinga analizuoti pradinėje jų itekėjimo zonoje, patenkant į patobulintą daugiakanalį cikloną – pirmajame kanale, kur, kaip prielaida, priimama, kad apskaičiuotos vertės bus maksimalios. Sukeliamą SDKD adheziją būtina vertinti ant vertikalių paviršių, nes daugiakanalio ciklono kanalai separavimo kameroje sudaryti iš kreivlininės formos elementų – išlenktų vertikalių plokščių yra nuolat drėkinami agresyviųjų dujų srautu. Be to, šiuo atveju adhezijos jėgą galima lyginti su gravitacijos ir išcentrine jėga. Tai nulemia kelis galimus įvykius: SDKD išliks prilipusi prie sienelės; kartu su dujų srautu bus išnešta pro išvalyto srauto itekėjimo ortakį; veikiant svorio jėgai nukris ant separavimo kameros dugno arba į ciklono kaupimo bunkerį.



3.3 pav. Patobulintas daugiakanalis ciklonas: a) vaizdas iš viršaus; b) periferiniu ir tranzitiniu srautais judančias kietąsias daleles veikiančios jėgos; 1 – išlenkti konfigūruoti kreivalinijinės ketvirtadaliai žiedo formos elementai; 2 – išorinis ištisinis žiedinis plyšys; 3 – užteršto dujų srauto ortakis; 4 – išvalyto dujų srauto pašalinimo ortakis; 5 – teorinių tyrimų nagrinėjama dalis; 6 – periferinio ir tranzitinio srautų sąveikoje paveikta kietoji dalelė; 7, 8 – grįžtamojo (periferinio (I kietoji dalelė)) ir įtekančio (tranzitinio (II kietoji dalelė)) agresyviųjų dujų srauto kietosios dalelės; 9 – kietoji dalelė veikiamą adhezijos jėgos; 10 – kietoji dalelė, krentanti pro išorinį ištisinį žiedinį plyšį, veikiant svorio jėgos; 11 – kietosios dalelės tamprus atšokimas nuo paviršiaus; 12 – judėjimo trajektorijos kanale nesant tranzitinio ir periferinio agresyviųjų dujų srautų sąveikos (šaltinis: autorius)

Fig. 3.3. Newly designed multi-channel cyclone: a) top view; b) the forces acting on the particles moving through peripheral and transitional streams profile; 1 – configured curved quarter-ring-formed elements; 2 – outer ringed continuous slit; 3 – dusted gas flow inlet duct; 4 – cleaned gas flow removal outlet duct; 5 – part of the theoretical research; 6 – particle interacting with peripheral and transitional flows; 7, 8 – incoming (transitional) and reciprocal (peripheral) aggressive gas flow particles; 9 – the particle is exposed to adhesion force; 10 – a particle falling through a outer ringed continuous slit, acting on the gravity force; 11 – a slight bounce of particles from the surface; 12 – in the absence of transitional and peripheral interactions between aggressive gas flows in the trajectory channel (source: author)

Kietosioms dalelėms judant ciklono kanaluose, jas apteka dujų srautas, dėl to atsiranda slėgio jėga, kuriai veikiant kietoji dalelė juda horizontaliame sraute. Dujų srauto sudaromos jėgos dydis, veikiantis kietąją dalelę, yra proporcingas dujų srauto greičio antrajam laipsniui, t. y. $F \sim \bar{u}^2$, todėl mažėjant dujų srauto greičiui ciklone, jėga sumažėja antruoju laipsniu. Dėl šios priežasties kietųjų dalelių

nutraukimas nuo paviršiaus, tolstant nuo ciklono įtekėjimo, reikšmingai mažėja ir esant 10–15 mm atstumui praktiškai išnyksta. Pagal mechanikos kreivalinijinio judėjimo dėsnius yra žinoma, kad slėgio jėga yra tiesiogiai proporcinga kietosios dalelės pasipriešinimo koeficientui ir jos skerspjūvio plotui, dujų srauto tankiui bei vidutiniam dujų srauto greičiui pakeltu antruoju laipsniu.

Šią priklausomybę pritaikius SDKD, judančioms patobulintame daugiakanaliame ciklone, nustatyta, kad esant neagresyviųjų dujų srauto sąlygoms slėgio jėga yra lygi 12,07 nN. Kietajai dalelei judant agresyviųjų dujų sraute, kai temperatūra kito 0–200 °C, o santykinis drėgnis 0–95 %, veikianti kietąją dalelę jėga sumažėja tik 1–1,5 %. Todėl agresyviųjų dujų srauto įtakos šios jėgos dydžiui galima nevertinti.

Kietąją dalelę veikianti išcentrinė jėga apibūdina jėgos dydį, kuriuo yra veikama charakteringa kietoji dalelė jai judant ciklono kanale aplink įrenginio ašį. Šios jėgos dydį nustato judančios kietosios dalelės inercija, nes jos judėjimo kryptis daugiakanaliame ciklone nuolat keičiasi.

Bendruoju atveju išcentrinės jėgos dydis yra tiesiogiai proporcingas kietosios dalelės tankiui, jos spindulio trečiajam laipsniui ir dujų srauto greičiui bei atvirkščiai proporcingas daugiakanalio ciklono kanalo, kuriuo juda nagrinėjamoji kietoji dalelė, spinduliui.

Agresyviųjų dujų sraute kietąją dalelę veikiančiai išcentrinei jėgai įvertinti, priimta prielaida, kad kietosios dalelės tankis yra lygus 1000 kg/m³, analizuojamos 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietosios dalelės. 1 μm skersmens kietąją dalelę veikianti išcentrinė jėga yra nykstamai maža dydžio, todėl jos vertinti nėra tikslinga.

Pagal išcentrinės jėgos teorinių tyrimų rezultatus (3.1 lentelė) galima matyti, kad 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietosios dalelės agresyviųjų dujų srautas, kurio temperatūra siekia 20 °C, esant 50 % santykiniam drėgniui, veikia atitinkamai 5,2 pN ir 335,1 pN jėga, santykis tarp jėgos dydžių lygus 64,4 karto. Išcentrinės jėgos dydis, esant pastoviam dujų srauto tankiui, buvo apskaičiuotas esant 95 % santykiniam drėgniui ir 100 °C temperatūrai. Taip pat galima pastebėti, kad rezultatai buvo gauti, esant perskaičiuotam dujų srauto greičiui, kuris kito dėl agresyviųjų dujų srauto temperatūros ir santykinio drėgnio nuo 12 m/s (esant neagresyviųjų dujų srauto sąlygoms) iki 10,7 m/s, esant 100 °C, ir iki 11,7 – esant 200 °C temperatūrai. Esant agresyviųjų dujų srauto 100 °C temperatūrai, išcentrinės jėgos dydis sumažėja apytiksliai 20 %, ir 2,5 μm kietosioms dalelėms lygus 4,2 pN, 10 μm – 266,7 pN. Esant atvejui, kai agresyviųjų dujų srauto temperatūra yra didžiausia – 200 °C, SDKD veikianti išcentrinė jėga nežymiai padidėja, lyginant su 100 °C temperatūros atveju, ir pasidaro lygi 5,0 pN ir 317,7 pN atitinkamai 2,5 μm ir 10 μm kietosioms dalelėms.

Patobulintame daugiakanaliame ciklone vykstanti periferinių–tranzitinių dujų srautų sąveika turi įtakos agresyviųjų dujų sraute veikiančioms jėgoms, tarp

jų ir išcentrinei jėgai. Teoriniuose tyrimuose buvo ištirtos 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietąsias daleles veikiančios išcentrinės–filtravimo jėgos.

Pasirinktas atvejis, kai viena (II) kietoji dalelė su agresyviųjų dujų srautu patenka į pirmąjį patobulinto ciklono kanalą ir juda pagrindine trajektorija (tranzitiniu agresyviųjų dujų srautu). Tuo pačiu laiku iš ketvirtąjo ciklono kanalo grįžtamąją trajektoriją (periferiniu agresyviųjų dujų srautu) pajuda kita pagal charakteristikas identiška kietoji dalelė (I), kuri patenka į pirmąjį kanalą ir jame abi kietosios dalelės susiduria. Tokiam uždaviniui ištirti daromos prielaidos: išcentrinė jėga nekinta ir pasiskirsto tolygiai tiriamajame pirmajame kanale; abiejų kietųjų dalelių trajektorijos lygiagrečios, o kietųjų dalelių greitis yra vienodas; periferiniu dujų srautu judanti kietoji dalelė, veikiamą išcentrinės jėgos, yra nustumama link išorinės sienelės, todėl jai patekus į pirmąjį kanalą jos trajektorija nukrypsta 30° kampų; skaičiavimuose kitų veikiančių jėgų nepaisoma (3.3 pav.).

Remiantis mechanikos dėsniais, periferiniu dujų srautu judančios I kietosios dalelės išcentrinės jėgos dydis sumažės ir bus lygus $\cos \alpha \cdot F_{isc.} = 0,866 \cdot F_{isc.t2}$, kur α – I kietosios dalelės trajektorijos nuokrypis, o $F_{isc.t2}$ – tranzitinio srauto II kietąją dalelę veikianti išcentrinė jėga.

Išcentrinei–filtravimo jėgai, veikiančiai antrąją kietąją dalelę, nustatyti remiamasi anksčiau gautais išcentrinės jėgos tyrimo rezultatais (3.1 lentelė). Galima teigti, kad esant 200 °C temperatūros ir 6,6 % santykinio drėgnio agresyviųjų dujų srautui išcentrinė–filtravimo jėga sumažėja apytiksliai 15 %, ir pasidaro lygi 4,3 pN ir 275,1 pN atitinkamai 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietosioms dalelėms. II kietąją dalelę, judančią tranzitiniame sraute, veikianti išcentrinė–filtravimo jėga nustatyta padarius prielaidą. Priimama prielaida, kad visa I kietosios dalelės išcentrinė–filtravimo jėga yra nukreipta II kietosios dalelės stabdymui bei išcentrinei jėgai sumažinti. Tuomet II kietąją dalelę veikianti išcentrinė–filtravimo jėga bus lygi $F_{isc.} \cdot \cos \alpha \cdot F_{isc.}$. Pastaroji jėga sumažės apytiksliai 7 kartus ir bus lygi 0,7 pN ir 42,6 pN atitinkamai 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietosioms dalelėms.

Remiantis atliktais tyrimais galima teigti, kad patobulintame daugiakanaliame ciklone pasireiškiantis filtravimas sumažina įtekančio agresyviųjų dujų srauto išcentrinę jėgą bei padidina jėgą, veikiančią kietąsias daleles, judančias iš ankstesnio kanalo kartu su periferiniu srautu. Būtina pabrėžti, kad tyrimams buvo taikytos prielaidos bei specifinės sąlygos, kurios nagrinėjamąjį atvejį supaprastina bei idealizuoja.

Kietajai dalelei judant patobulinto ciklono kanalu, ją veikia ne tik agresyviųjų dujų srauto išcentrinės jėgos, bet ir pačios kietosios dalelės, turinčios masę ir gravitacijos jėgos. Kadangi ši jėga veikia vertikaliai žemyn, todėl ji pakreipia kietosios dalelės judėjimo trajektoriją link separavimo kameros dugno, o kietosios dalelės, patekusios pro segmentinius žiedinius plyšius yra atskiriamos iš dujų

srauto ir nusodinamos ciklono bunkeryje. Pagal bendrąją svorio jėgos fizikinę išraišką, ši jėga tiesiogiai proporcinga nagrinėjamos kietosios dalelės skersmens trečiajam laipsniui bei šios kietosios dalelės tankiui.

3.1 lentelė. Teoriškai nustatyta kietąją dalelę veikianti išcentrinė jėga patobulintame daugiakanaliame ciklone (šaltinis: autorius)

Table 3.1. Particle acting centrifugal force in newly designed multi-channel cyclone (source: author)

Agresyviųjų dujų srauto temperatūra ir greitis daugiakanaliame ciklone esamomis sąlygomis	Kietąją dalelę veikianti išcentrinė jėga, pN	
	Kietosios dalelės skersmuo 2,5 μm	Kietosios dalelės skersmuo 10 μm
esant parinktam 50 % agresyviųjų dujų srauto santykiniam drėgniui		
kai $t_{d.s.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U = 12,0\text{ m/s}$	5,2	335,1
esant pastoviam agresyviųjų dujų srauto tankiui ir jam atitinkančiam santykiniam drėgniui		
kai $t_{d.s.} = 100\text{ }^{\circ}\text{C} / 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi_{d.s.} = 95\text{ \%} / 6,6\text{ \%}$, $U = 10,7\text{ m/s} / 11,7\text{ m/s}$	4,2/5,0	266,7 / 317,7

Agresyviųjų dujų sraute SDKD veikia esantys vandens garai bei kiti cheminiai junginiai, kurie didina kietųjų dalelių svorį, o tuo pačiu didėja gravitacijos jėga. Tam tikslui buvo nustatyta skirtingo skersmens (1 μm , 2,5 μm ir 10 μm) ir tankio 500–2000 kg/m^3) SDKD veikianti agresyviųjų dujų sraute gravitacijos jėga. Daroma prielaida, kad kietoji dalelė yra apvali bei nepaisoma kietosios dalelės įsotinimo agresyviųjų dujų sraute.

Analizė parodė, kad mažiausią iš pasirinktųjų 1 μm skersmens kietąją dalelę veikia 0,003–0,01 pN dydžio gravitacijos jėga, atitinkamai esant 500–2000 kg/m^3 SDKD tankiui. Didėjant tankiui, gravitacijos jėga didėja pagal linijinę priklausomybę, tačiau didžiausias santykis nustatytas analizuojant 500 kg/m^3 ir 1000 kg/m^3 atvejus. Vertinant kietąsias daleles, kurių dydis lygus arba didesnis nei 2,5 μm , vertės sparčiai didėja, o skirtumas tarp šių jėgų atitinkamai lygus vidutiniškai 11,7 karto. 10 μm skersmens kietąsias daleles veikia 8 kartus didesnė gravitacijos jėga nei 2,5 μm skersmens kietąsias daleles. Gravitacijos jėga veikia 1 μm kietąsias daleles 0,01 pN, o 10 μm – jėgos vertė lygi 10,3 pN. Kaip ir analizuojant kitas veikiančias jėgas, labiausiai jėgų dydžiai pradeda didėti esant kietosioms dalelėms virš 2,5 μm .

Adhezijos reiškiniai atsiranda susiliečiant kūnams ir yra jų molekulinio tarpusavio veikimo rezultatas, kuris pasireiškia tiesioginio kietosios dalelės ir paviršiaus kontakto metu. Adhezijos jėga priklauso nuo kontakto paviršiaus ploto, nes molekulinė sąveika proporcinga kontakto plotui. Patobulintame daugiakanaliame cikle yra vertinama adhezijos jėga, kuri veikia tarp kietųjų dalelių, judančių agresyviųjų dujų sraute, ir vertikalių vidinių paviršių, t. y. separavimo kameros periferinė sienelė ir įrengti ketvirtadalio žiedo formos elementai su atlenktomis plokštelėmis.

Smulkios kietosios dalelės turi didesnę paviršiaus plotą, lyginant su stambios kietosios dalelės dydžiu, ir jų adhezijos jėgos dydis yra didesnis negu stambių kietųjų dalelių. Dėl šios priežasties stambių kietųjų dalelių nutraukimui nuo paviršiaus reikalinga mažesnė jėga nei SDKD nutraukimui. Todėl stambesnės kietosios dalelės yra nutraukiamos nuo paviršiaus lengviau ir esant mažesniems dujų srauto greičiams.

Prikibusių smulkiadispersių kietųjų dalelių atitraukimas nuo vertikalaus paviršiaus, veikiant dujų srautui, vyksta tokiu būdu: pirmiausiai yra atitraukiamos viršutinės stambesnės kietosios dalelės, vėliau smulkesnės, t. y. įveikiamos sluoksnio adhezijos jėgos. Tik viršutinių kietųjų dalelių nutraukimas galimas, kai $F_{adh} > F_{autoh}$. Kietųjų dalelių nutraukimas, veikiant autohezijos jėgoms, vadinamas erozija. Kai $F_{adh} < F_{autoh}$, įvyksta sluoksnio nutraukimas išilgai paviršiaus. Šiuo atveju yra įveikiamos adhezijos jėgos, o šis procesas vadinamas denudacija.

Šiame teoriniame tyrime adhezijos jėga buvo įvertinta pagal didžiausią šios jėgos dydį, t. y., kai tarpas tarp kietosios dalelės ir plokštumos paviršiaus yra lygus $4 \cdot 10^{-10}$ m.

Remiantis tyrimų rezultatais galima teigti, kad 1 μm ir 2,5 μm SDKD veikianti adhezijos jėga buvo didesnė nei gravitacijos. 1 μm skersmens veikianti maksimali adhezijos jėga lygi 0,24 pN, o 2,5 μm – 0,6 pN. Tačiau didėjant skersmeniui, jėgos dydis didėja tolygiai bei, lyginant su kitomis jėgomis, adhezijos jėgos reikšmė mažėja. Atsižvelgiant į tai, galima priėti prie išvados, kad tokios kietosios dalelės yra labiau linkusios kauptis ant patobulinto daugiakanalio ciklono vertikalių vidinių elementų dėl to, kad adhezijos jėga tokiu atveju yra didesnė už gravitacijos jėgą. Ir atvirkščiai, kietosios dalelės lygios arba didesnės nei 10 μm bus lengvai atitraukiamos nuo paviršių net veikiant tik gravitacijos jėgos. 10 μm skersmens kietąsias daleles veikia 2,4 pN adhezijos jėgos.

Adhezijos jėgos teorinį tyrimą galima nagrinėti kaip jėgų, kurios sąlygoja kietosios dalelės sukibimo arba, atvirkščiai, atitraukimo nuo paviršiaus reiškinį palyginimą. Tokiam tyrimui buvo pasirinktos 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietosios dalelės, kurių tankis lygus 1000 kg/m³ (3.3 pav.).

Agresyviųjų dujų sraute judanti 2,5 μm skersmens kietoji dalelė yra veikiamą 0,7 pN išcentrinė–filtravimo jėga, tuo tarpu adhezijos jėga yra 14,3 % mažesnė. Tuo remiantis galima teigti, kad kietosios dalelės adhezijos, t. y. sukibimo su

paviršiumi jėga, nepajėgs sulaikyti kietosios dalelės ant daugiakanalio ciklono separavimo kameros pirmojo kanalo vertikalaus paviršiaus, todėl ji atšoks nuo jo ir judės toliau ciklono kanalu. Atšokimas nuo sienelės įvyks ir judant 10 μm skersmens kietajai dalelei, kadangi išcentrinė–filtravimo jėga šiuo atveju yra didesnė 19,3 karto.

Teoriškai buvo nustatyta, kad 10 μm skersmens kietoji dalelė sukibs ir išliks ant paviršiaus tuo atveju, kai 200 $^{\circ}\text{C}$ ir 6,6 % santykinio drėgnio agresyviųjų dujų srauto greitis pirmojo kanalo tiriamoje zonoje bus ne didesnis nei 2,8 m/s, t. y., kai adhezijos jėga (2,4 pN) bus didesnė nei išcentrinė–filtravimo (2,39 pN). Mažesnėms SDKD, pvz., 2,5 μm skersmens kietajai dalelei, yra pakankama, kad greitis sumažėtų nuo 11,7 m/s iki 11,0 m/s, tada adhezijos jėga (0,6 pN) bus didesnė už išcentrinę–filtravimo (0,59 pN) ir vyks adhezija.

Dujų srautas, judant patobulintame daugiakanaliame ciklone, yra turbulentinio pobūdžio, todėl pasipriešinimo jėga pagal taikomas aerodinamikos fizikines išraiškas yra tiesiogiai proporcinga kietosios dalelės skersmeniui pakeltu antruoju laipsniu, dujų srauto tankiui bei agresyviųjų dujų srauto greičio patobulinto daugiakanalio ciklono pirmajame kanale ir judančios jame kietosios dalelės greičio skirtumo vertei, pakeltai antruoju laipsniu.

Taikant dinaminės ir kinematinės klamos koeficientų sąryšį $\mu = v \cdot \rho$, pasipriešinimo jėgos lygtyje turbulentinio agresyviųjų dujų srauto tekėjimo tyrimui įvertinamas kietajai dalelei apskaičiuotas Reinoldso skaičius. Pasipriešinimo jėgai įvertinti daromos prielaidos, kad kietoji dalelė yra apvalios formos, o jos greitis yra 5 % mažesnis nei agresyviųjų dujų srauto. Jėgos dydis apskaičiuotas 1 μm , 2,5 μm ir 10 μm kietosioms dalelėms, o agresyviųjų dujų srauto greitis ciklono pirmajame kanale – 11,7 m/s. Atlikus analizę, prieita prie išvados, kad agresyviųjų dujų srautas turi tik nežymią įtaką pastarosios jėgos dydžiui, kai vertės pakinta 0,001 pN dydžiu. Tokiu būdu, nagrinėjant agresyviųjų dujų srautą, šios jėgos pokyčių dėl temperatūros ir santykinio drėgnio skirtumų, lyginant su neagresyviųjų dujų srauto sąlygomis, galima nepaisyti. Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad 1 μm skersmens kietąją dalelę veikia 0,076 pN pasipriešinimo jėga, tuo metu apskaičiuotas Reinoldso skaičius kietajai dalelei lygus 0,030. Kietosios dalelės skersmuo turi didelės įtakos veikiančiai jėgai, taip 2,5 μm skersmens kietajai dalelei jėga padidėjo 6,3 karto ir tampa lygi 0,47 pN, o Reinoldso skaičius – 2,5 karto didesnis ir lygus 0,075. Analizuojant pasipriešinimo jėgą, veikiančią didžiausią kietąją dalelę, kurios skersmuo siekia 10 μm , galima teigti, kad jėga padidėja žymiai, o vertė lygi 7,56 pN. Reinoldso skaičius šio skersmens kietajai dalelei lygus 0,299. Galima matyti, kad didesnės nei 2,5 μm skersmens kietąsias daleles veikiančios pasipriešinimo jėgos ypač stipriai padidėja.

Kietąją dalelę veikianti pasipriešinimo jėga agresyviųjų dujų sraute yra 1,49 ir 5,63 karto mažesnė nei išcentrinė–filtravimo jėga, vertinant atitinkamai 2,5 μm ir 10 μm SDKD. Pagal gautus rezultatus galima matyti, kad judančias agresyviųjų

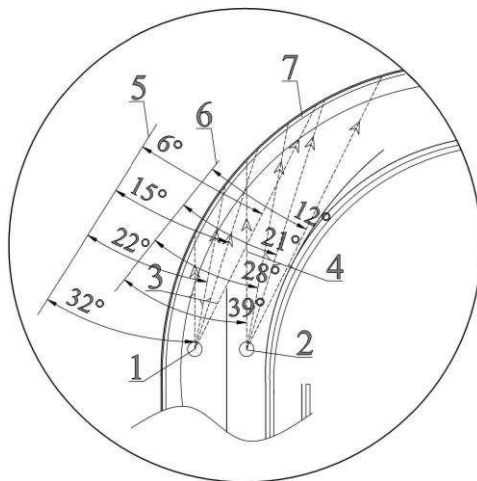
dujų sraute kietąsias daleles veikia pasipriešinimo jėga, kurios negalima nepaisyti. Ši jėga turi įtakos SDKD trajektorijai daugiakanaliame cikle, kadangi paveikiamos kietosios dalelės yra stabdomos agresyviųjų dujų sraute. Akivaizdu, kad didesnio skersmens kietąsias daleles veikia didesnė pasipriešinimo jėga, tačiau, lyginant su kietąsias daleles veikiančia išcentrine–filtravimo jėga, šiuo atveju santykis tarp $2,5 \mu\text{m}$ skersmens kietosios dalelės ir $10 \mu\text{m}$ veikiančios jėgos lygus 16 kartų, išcentrinės–filtravimo – 60,9 karto. Taip pat galima pastebėti, kad kietųjų dalelių skersmeniui didėjant dvigubai, veikiančios pasipriešinimo jėgos dydis didėja apytiksliai keturis kartus. Tokia priklausomybė sąlygoja pasipriešinimo jėgos veikimo į visą kietosios dalelės plotą, esantį tiesioginiame agresyviųjų dujų srauto kelyje. Todėl, kietosios dalelės dydžiui padidėjus dvigubai, skerspjuvio plotas padidėja keturis kartus ir tai ženkliai padidina pasipriešinimą.

Esant sąlyčiui su nedrėkinamu plokščiu paviršiumi, adhezija dėl kapiliarinių jėgų yra tiesiogiai proporcinga paviršiaus, šiuo atveju, vandens sluoksnio ant metalinių daugiakanalio ciklono sienelių, įtempiui, atstumui tarp šio paviršiaus ir kietosios dalelės bei drėkinimo kampo. Autohezijos jėga, kuri pasireiškia tarp jau sukibusių prie sienelės kietųjų dalelių bei ant kietųjų dalelių paviršiaus esamų vandens lašelių, yra dvigubai mažesnė nei adhezijos, kadangi vyksta tik išorinėje kietosios dalelės pusės bendro paviršiaus ploto dalyje.

Teoriniuose tyrimuose ištirta maksimali adhezijos ir autohezijos jėga, kuri veikia kietąją dalelę agresyviųjų dujų sraute. Tam tikslui priimta prielaida, kad kietoji dalelė patenka į pirminį daugiakanalio ciklono dujų įtekėjimą ir iš skerspjuvio centro skirtingais kampais juda pirmuoju kanalu (3.4 pav.). Daroma prielaida, kad vandens lašeliai yra pasiskirstę visame periferinės sienelės paviršiaus plote tolygiai, o vandens lašelių agresyviųjų dujų sraute temperatūra siekia $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, tuomet paviršiaus įtempis lygus $37,8 \text{ mN/m}$. Drėkinimo kampas nustatytas tarp bendros pirmo kanalo kreivumo linijos ir kietosios dalelės trajektorijos linijos kiekvienam ištirtam atvejui. Atstumas tarp kietosios dalelės ir paviršiaus yra pasirinktas toks pat, kaip ir vertinant adhezijos jėgą veikiant molekulinei sąveikai, t. y. $4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, kadangi šiam atstumui esant traukos jėgos yra didžiausios, lyginant su stūmos jėgomis.

Atlikus teorinius tyrimus nustatyta, kad adhezijos– ir autohezijos–kapiliarinė jėga veiks stipriau tranzitinę kietąją dalelę nei periferinę, nes visais atvejais drėkinimo kampas įtekančios į cikloną kietosios dalelės bus mažesnis. Remiantis atliktais teoriniais tyrimais nustatyta, kad didžiausia autohezijos jėga lygi $94,5 \text{ pN}$, o adhezijos – 189 pN , kuri veikia tranzitinę kietąją dalelę, kai drėkinimo kampas kito nuo 6° iki 32° . Tuo tarpu periferinę kietąją dalelę veikia jėga vidutiniškai $4,5\%$ mažesnė, kadangi drėkinimo kampas kito $12\text{--}39^{\circ}$ intervale, o didžiausia nustatyta jėga – adhezijos, esant 12° kampui, lygi $185,9 \text{ pN}$. Pagal pateiktą 3.4 paveikslą galima matyti, kad adhezijos kapiliarinė jėga bus didžiausia ciklono kanalo vietose, kur paviršiaus kreivumas bus didžiausias, t. y. išilgai periferinės

sienelės. Kreivumo kampas didėja tuo labiau, kuo toliau nuskrieja kietoji dalelė kanalu iki sąveikos su sienelės paviršiumi. Todėl galima daryti išvadą, kad kietųjų dalelių adhezija, veikiant kapiliarinėms jėgoms, bus stipresnė ciklono kanalų pabaigoje nei pradžioje, esant prielaidai, kad agresyviųjų dujų srautas visame kanale tolygus ir tokių pat charakteristikų.

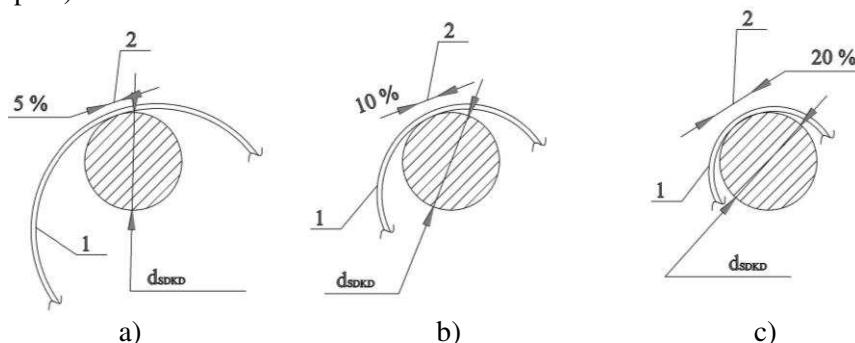


3.4 pav. Periferiniu ir tranzitiniu srautais judančių kietųjų dalelių trajektorijos ir drėkinimo kampai adhezijos–kapiliarinės jėgos tyrimui (dalelių dydžių nepaisoma) pirmajame patobulinto ciklono kanale: 1 – kietoji dalelė, judanti tranzitiniu dujų srautu, patekusi į pirminį daugiakanalio ciklono dujų įtekėjimą; 2 – kietoji dalelė, judanti periferiniu dujų srautu, grįžtanti iš ketvirtąjo į pirmąjį kanalą; 3 ir 4 – tranzitinės ir periferinės kietųjų dalelių trajektorijos ir jas atitinkantys drėkinimo kampai; 5 ir 6 – pirmojo kanalo kreivumo linijos drėkinimo kampui nustatyti; 7 – vandens lašelių sluoksnis ant periferinės daugiakanalio ciklono sienelės (šaltinis: autorius)

Fig. 3.4. Peripheral and transitional moving particles' trajectories and irrigation angles for adhesion–capillary force analysis (disregarding particle sizes) in the 1st newly designed cyclone channel: 1 – the particle moving through the transitional gas flow entering the primary gas inlet of multi-channel cyclone; 2 – the particle moving through the peripheral gas flow, returning from the 4th to the 1st channel; 3 and 4 – transitional and peripheral particle trajectories and corresponding irrigation angles; 5 and 6 – determining the curvature of the 1st channel for the irrigation angle; 7 – a layer of water droplets on the peripheral multi-channel cyclone wall (source: author)

Lyginant su kitomis kietąją dalelę veikiančiomis jėgomis, galima teigti, kad adhezijos kapiliarinė jėga savo dydžiu yra reikšminga, nežymiai mažesnė už išcentrinę–filtravimo jėgą ir didesnė (daugiau nei 10 kartų) už pasipriešinimo ar gravitacijos jėgas.

Smulkiadisversės kietosios dalelės, patekusios kartu su agresyviųjų dujų srautu į daugiakanalį cikloną, susiliečia su jo vidiniais paviršiais. Ant SDKD paviršių esantys elektriniai krūviai traukia ant ciklono paviršiaus esančius lygius, tačiau priešingo ženklo krūvius. Remiantis mokslininkų tyrimais (Fletcher, Briggs, Ferguson & Gillen, 2008; Ibrahim, Burk, Etzler & Neuman, 2000), vertinant adhezijos elektrinę jėgą, būtina priimti prielaidą, kad kietajai dalelei atitūkus nuo ciklono paviršiaus, ant to paviršiaus išlieka perteklinis krūvis, kuris savo dydžiu lygus kietosios dalelės krūviui, bet priešingo ženklo. Tokiu atveju, adhezijos elektrinė jėga yra tiesiogiai proporcinga kietosios dalelės krūviui (Cu), nutraukimo nuo sienelės metu pakeltu antruoju laipsniu bei atvirkščiai proporcinga kietosios dalelės sąlyčio paviršiui (cm^2) su daugiakanalio ciklono sienele (3.5 pav.).



3.5 pav. Įkrautos kietosios dalelės, kurios skersmuo d_{SDKD} , sąveika su priešingo krūvio daugiakanalio ciklono skirtingo kreivumo paviršiumi: a), b) ir c) skirtingo sąlyčio paviršiaus atvejai; 1 – skirtingo kreivumo daugiakanalio ciklono paviršius; 2 – sąlyčio paviršius, išreikštas procentais nuo viso kietosios dalelės paviršiaus ploto (šaltinis: autorius)

Fig. 3.5. The interaction of charged particles with a diameter d_{SDKD} on the surface of the curvature of the opposite volume multi-channel cyclone: 1 – the multi-channel cyclone surfaces of different curvature; 2 is the contact surface, expressed as a percentage of the total particle surface (source: author)

Kietosios dalelės krūvio matavimo vienetams suvienodinti yra naudojamas daugiklis, lygus 2π . Yra priimtas supaprastintas atvejis, kai nėra vertinamos paviršinės ir giluminės abiejų sąlyčio paviršių savybės. Teoriniams tyrimams atlikti SDKD buvo priimtos kaip idealios sferinės formos kietosios dalelės, tokiu būdu jų paviršiaus plotas buvo lygus $3,14 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$, $1,96 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2$ ir $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$ atitinkamai $1 \mu\text{m}$, $2,5 \mu\text{m}$ ir $10 \mu\text{m}$ kietosioms dalelėms. Šioms kietosioms dalelėms, priklausomai nuo paviršiaus kreivumo, nustatytas sąlyčio plotas. Priimta prielaida, kad $1 \mu\text{m}$ skersmens kietosios dalelės krūvis yra lygus $20 \cdot 10^{-15} \text{ Cu}$, $2,5 \mu\text{m}$ – $40 \cdot 10^{-15} \text{ Cu}$, o $10 \mu\text{m}$ – $100 \cdot 10^{-15} \text{ Cu}$, tokio dydžio

pertiklinis krūvis buvo nustatytas stiklo kietąją dalelę atitraukus nuo metalinio paviršiaus. Tokiu atveju adhezijos elektrinė jėga, esant 5 %, t. y. esant mažiausiam iš pasirinktų paviršiaus sąlyčio atvejui, bus lygi $1,6 \cdot 10^{-6}$ pN, $1,02 \cdot 10^{-6}$ pN ir $4 \cdot 10^{-7}$ pN atitinkamai 1 μm , 2,5 μm ir 10 μm SDKD. Didėjant sąlyčio plotui, kietosios dalelės krūvis perduodamas paviršiui proporcingai mažėja, o SDKD adhezijos elektrinė jėga lygi $2\text{--}8 \cdot 10^{-6}$ pN. Kai sąlyčio paviršius yra lygus 20 % nuo viso kietosios dalelės paviršiaus ploto, adhezijos elektrinė jėga, veikianti 1–10 μm SDKD, yra ypač maža – ne didesnė nei $4 \cdot 10^{-7}$ pN. Remiantis atliktais tyrimais, galima teigti, kad adhezijos elektrinė jėga, kai kietųjų dalelių krūviai yra pakankamai maži, nėra reikšminga ir įtakos SDKD adhezijai daugiakanaliame cikle neturi, nes kitos jėgos savo dydžiais yra 3–4 eilėmis didesnės.

Buvo papildomai atlikti tyrimai, įvertinant pikinį SDKD krūvį, kuriam esant elektrinė jėga bus didesnė nei adhezijos ar išcentrinė–filtravimo. Teoriniais tyrimais nustatyta, kad, priklausomai nuo kietosios dalelės skersmens, adhezijos elektrinė jėga bus lygi 62,5 pN – 1000 pN, jei kietoji dalelė turės $0,5\text{--}2,5 \cdot 10^{-9}$ Cu krūvį. Galima teigti, kad šiuo atveju net ir 10 μm SDKD, turėdamos $2,5 \cdot 10^{-9}$ Cu krūvį, gali žymiai padidinti adheziją daugiakanaliame cikle, patenkant su agresyviųjų dujų srautu į daugiakanalio ciklono pirmąjį kanalą, nes adhezijos elektrinė jėga bus lygi 62,5–250 pN, t. y. didesnė už pvz., adhezijos išcentrinę jėgą. Tačiau tokį krūvį kietosios dalelės gali turėti tik joms patekus į išlydžio lauką, kuris sudaromas specialiai, pvz., elektrostatiname filtre. Palyginimui išlydžio lauke kvarco kietosios dalelės gauna $0,32 \cdot 10^{-12}$ Cu krūvį, polimerinės medžiagos kietosios dalelės gali įgauti žymiai didesnę $3 \cdot 10^{-5}$ Cu krūvį. Įvertinus visus atvejus galima daryti išvadą, kad adhezijos elektrinės jėgos, veikdamos lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD, neturės reikšmingos įtakos adhezijos daugiakanaliame cikle padidėjimui.

Remiantis išraiška (2.4) yra nustatytas teorinis SDKD išmetimo koeficientas, kuris lygus 0,11, tuomet valymo efektyvumas patobulintame daugiakanaliame cikle yra lygus 0,88 arba 88 %. Šiam tyrimo rezultatui yra daromos prielaidos: ketvirtadalio žiedo formos elementas yra prilyginamas pusžiedžiui, t. y. išlaikoma uždaro kontūro elemento sąlyga; nustatytas maksimalus bendras valymo efektyvumas, nepaisant agresyviųjų dujų srauto įtakos bei sugaudomų dalelių vidutinio skersmens.

Buvo atlikti teoriniai agresyviųjų dujų srauto matematiniai apskaičiavimai, esant įvairioms temperatūros ir drėgnio sąlygoms. Aukšto tikslumo rezultatams pasiekti atrinktos empirinės išraiškos. Šios išraiškos turi riboto taikymo intervalą sprendžiant agresyviųjų dujų srauto judėjimą daugiakanaliame cikle.

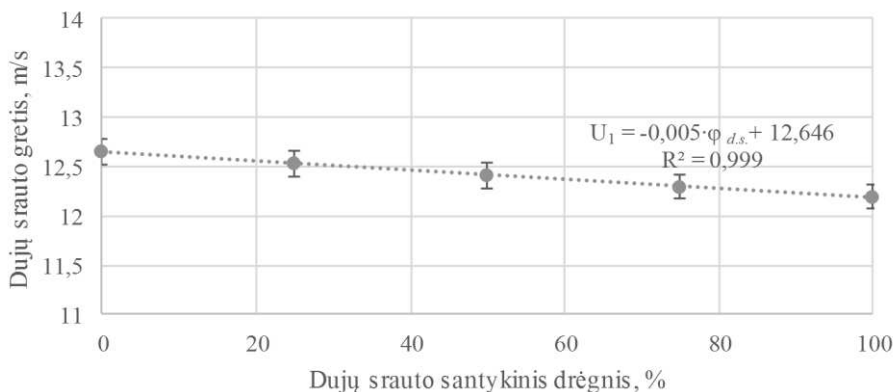
Pagal gautus teorinius rezultatus, buvo sudaryta pritaikyta matematinė išraiška (3.3) dujų srauto greičiui nustatyti, kurioje vertinamas agresyviųjų dujų srauto santykinis drėgnis:

$$U_1 = x_2 \cdot \varphi_{d.s.} + y_2, \quad (3.3)$$

kai $t_{d.s.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = -0,0008$, $y_2 = 12,0400$; kai $t_{d.s.} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = 0,0046$, $y_2 = 12,6467$; kai $t_{d.s.} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = 0,0296$, $y_2 = 13,4460$; kai $t_{d.s.} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = -0,5482$, $y_2 = 15,3022$;

čia U_1 – agresyviųjų dujų srauto greitis ciklone, m/s; $\varphi_{d.s.}$ – agresyviųjų dujų srauto santykinis drėgnis, %; ši išraiška gali būti taikoma, kai agresyviųjų dujų srauto temperatūra $t_{d.s.} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, o santykinis drėgnis $\varphi_{d.s.} = 0\text{--}95\text{ }%$, x_2 – greičio pirmasis kintamasis, m/(s·%); y_2 – greičio antrasis kintamasis, m/s.

Skaičiavimo tikslumas buvo nustatytas taikant skirtingo dujų srauto santykinio drėgnio vertes. Nuokrypis taikomai 3.3 formulei siekė nuo $-0,01\text{ }%$ (kai $\varphi_{d.s.} = 95\text{ }%$) iki $+0,05\text{ }%$ (kai $\varphi_{d.s.} = 50\text{ }%$).



3.6 pav. Agresyviųjų dujų srauto greičio priklausomybė nuo dujų srauto santykinio drėgnio teorinei išraiškai gauti, kai dujų srauto temperatūra lygi $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

(šaltinis: autorius)

Fig. 3.6. Dependence of aggressive gas flow velocity on gas flow relative humidity to form theoretical expression, when a gas flow temperature was equal to $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

(source: author)

Pagal gautus rezultatus galima daryti prielaidą, kad gauta matematinė išraiška gali būti taikoma nagrinėjamam $0\text{--}95\text{ }%$ santykinio drėgnio intervalui agresyviųjų dujų srauto greičiui apskaičiuoti. Taikant šią išraišką nuokrypis nuo tikrosios teorinės vertės neviršija $0,05\text{ }%$.

Teoriniuose tyrimuose yra išanalizuota agresyviųjų dujų srauto greičio priklausomybė nuo dujų srauto temperatūros, kai buvo pasiektas maksimalus agresyviųjų dujų srauto santykinis drėgnis. Matematinė išraiška sudaryti agresyviųjų dujų srauto dinaminis slėgis buvo išlaikomas pastovus ir lygus $86,8\text{ Pa}$, esant

20 °C temperatūrai ir 0 % santykiniam drėgmeniui, o tai atitinka 12 m/s dujų srauto greitį.

Analogiškai su agresyviųjų dujų srauto greičio išraiška, priklausomai nuo dujų srauto drėgnio, buvo gauti verčių nuokrypiai (3.7 pav.) bei sudaryta specialiai pritaikyta matematinė išraiška (3.4) priklausomybei nuo agresyviųjų dujų srauto temperatūros nustatyti:

$$U_2 = x_3 \cdot t_{d.s.} + y_3, \quad (3.4)$$

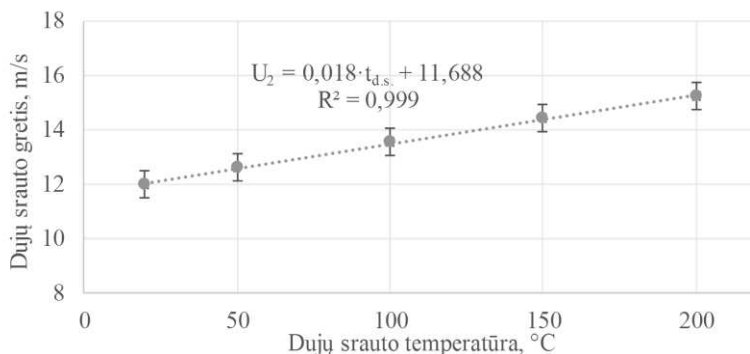
kai $\varphi_{d.s.} = 0 \%$, $x_3 = 0,018$, $y_3 = 11,6878$; kai $\varphi_{d.s.} = 50 \%$, $x_3 = -0,0042$, $y_3 = 12,2145$; kai $\varphi_{d.s.} = 95 \%$, $x_3 = -0,0034$, $y_3 = 11,8551$;

čia U_2 – dujų srauto greitis patobulintame daugiakanaliame ciklone, m/s; $t_{d.s.}$ – agresyviųjų dujų srauto temperatūra, °C; ši išraiška gali būti taikoma, kai dujų srauto temperatūra $t_{d.s.} = 20\text{--}200$ °C, o santykinis drėgnis, esant 150 °C ir 200 °C temperatūrai, įvertintas kaip maksimalus pasiekiamas, x_3 – greičio pirmasis kintamasis; y_3 – greičio antrasis kintamasis.

Remiantis sudaryta specialiai pritaikyta 3.4 išraiška, nustatyta, kad agresyviųjų dujų srauto (kai $t_{d.s.} = 80$ °C, o $\varphi_{d.s.} = 95 \%$, t. y. atitinka eksperimentinių tyrimų atvejį) greitis patobulinto daugiakanalio ciklono pirmojo kanalo pradžioje bus lygus 11,6 m/s, kai vidutinis dujų srauto greitis kanaluose lygus 12 m/s. Atlikus tyrimų rezultatų analizę buvo nustatyta, kad gauti nedideli nuokrypiai, tik esant 0 % santykiniam drėgmeniui (3.4 lentelė). Atvejais, kai santykinis drėgnis siekia 50 % arba 95 %, nėra galimybių sudaryti tikslią specialiai pritaikytą išraišką parametrams apskaičiuoti.

Agresyviųjų dujų srauto greitis, apskaičiuotas pagal empirinę formulę, yra didesnis 0,4 % nei apskaičiuotas pagal teorinę išraišką, kai temperatūra yra 20 °C. Nepaisant to, galima teigti, kad gauta matematinė išraiška gali būti taikoma nagrinėjamam 20–200 °C temperatūros intervalui agresyviųjų dujų srauto greičiui apskaičiuoti. Taikant šią išraišką, vidutinis nuokrypis nuo tikrosios teorinės vertės neviršija 0,26 %.

Dujų srauto tekėjimą ciklono kanalu galima prilyginti neapibrėžtiniam judėjimui, tačiau ryšiai tarp kanalų, t. y. periferiniai ir tranzitiniai srautai sudaro papildomą pritekėjimą/nutekėjimą, todėl judėjimas įgauna turbulentiškumo. Atlikus apskaičiavimus, buvo gauti Reinoldso skaičiaus kitimo rezultatai ciklono pirmojo kanalo viduryje, kai dujų srauto greitis lygus 12 m/s (esant $t_{d.s.} = 20$ °C, $\varphi_{d.s.} = 50 \%$), taigi priimta prielaida, kad ciklono kanalo plotis lygus 0,083 m, o aukštis – 0,3 m.



3.7 pav. Ištirta ir nustatyta agresyviųjų dujų srauto greičio priklausomybė nuo dujų srauto temperatūros (šaltinis: autorius)

Fig. 3.7. Dependence of aggressive gas flow velocity on gas flow relative humidity (source: author)

Nustatyta, kad esant pastoviam 50 % santykiniam drėgniui ir nežymiai kylant temperatūrai, Reinoldso skaičius sumažėja nuo $6,71 \cdot 10^4$ esant 20 °C temperatūrai iki $6,07 \cdot 10^4$ – esant 50 °C. Dujų srautas laikomas turbulentinu, kai Re skaičius yra didesnis nei 10^4 . Agresyviųjų dujų srauto temperatūrai esant 100 °C, Reinoldso skaičius lygus $5,77 \cdot 10^4$ ir $6,38 \cdot 10^4$ atitinkamai esant 50 ir 95 % santykiniam drėgniui. Pastebėta, kad Re skaičiaus sumažėjimas yra reikšmingas, kai temperatūros kyla virš 100–150 °C. Esant 150 °C temperatūrai ir jai atitinkančiam didžiausiam 21,5 % santykiniam drėgniui, Re skaičius lygus $5,61 \cdot 10^4$. Kraštutiniam agresyviųjų dujų srauto atvejui esant, kai temperatūra lygi 200 °C, o maksimalus galimas santykinis drėgnis – 6,6 %, Re skaičiaus vertė lygi $4,97 \cdot 10^4$.

3.2. Agresyviųjų dujų srauto sudarymo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Tiriant agresyviųjų dujų srautą yra nustatyti temperatūros pokyčiai patobulinto daugiakanalio ciklono stende (2.1 pav.). Santykinis drėgnis visais atvejais buvo daugiau nei 95 % (virš prietaiso matavimo ribos) (3.2 lentelė).

Visais atvejais autoklavo viduje pasiekiamas ir išlaikomas 6 bar slėgis.

Vienas pagrindinių patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais taikymo privalumų yra eksploatavimas esant agresyviųjų dujų srautui – aukštos temperatūros, didelio drėgnio ir cheminiais junginiais užteršto dujų srauto valymas. Šiam tikslui pasiekti yra tiriamas daugiakanalis ciklonas, kurio konstrukcijoje netaikomi papildomi konstrukciniai sprendimai adhezijai

mažinti. Tokiu būdu įmanoma nustatyti daugiakanalio ciklono konstrukcijos užsikimšimą, esant agresyviųjų dujų srautui prieš kuriant jo naują konstrukciją.

3.2 lentelė. Agresyviųjų dujų srauto temperatūros kitimas daugiakanalio ciklono stende (šaltinis: autorius)

Table 3.2. Changes of aggressive gas flow parameters in the multi-channel cyclone stand (source: author)

Taško eil. Nr.	Dujų srauto temperatūra $t_{d.s.}, ^\circ\text{C}$, kai vidutinis greitis ciklone:		
	16 m/s	12 m/s	8 m/s
1 (Autoklavas)	145	145	145
2 (Ortakis prieš cikloną)	110	110	115
3 (Įtekėjimas į cikloną)	70	80	90
4 (Ciklone)	60	70	75
5 (Ortakis po ciklono 1)	55	60	65
6 (Ortakis po ciklono 2)	50	55	60

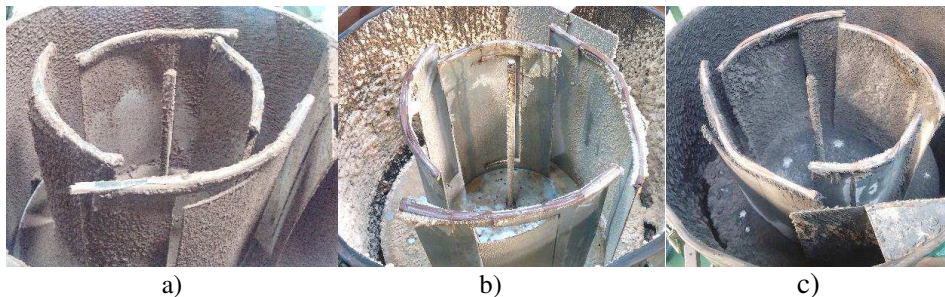
Atlikus eksperimentinius tyrimus, panaudojant lignino, medienos ir medienos pelenų kietąsias daleles buvo nustatytas konstrukcijos pasidengimas kietosiomis dalelėmis, praleidus $150\,000\text{ m}^3$ agresyviųjų dujų, t. y. apytiksliai po 150 ciklono darbo valandų, kai temperatūra siekė $145\text{ }^\circ\text{C}$, o santykinis drėgnis buvo daugiau nei 95 %. Vidutinė SDKD koncentracija siekė iki 5 g/m^3 .

Kaip galima matyti 3.8 paveiksle, kietųjų dalelių didžioji dalis kaupiasi pirmajame ciklono kanale ties dujų srauto įtekėjimu bei antrajame kanale, sudarant 1–2 mm nutrūkstamas adhezijos zonas.

Analizuojant medienos SDKD, matyti, kad ant periferinės sienelės adhezija didžiausia. Pastaruoju atveju kietąsias daleles veikia ir stipresnė autoheziija, dėl to susidaro medienos dribsniai, kurių dydis siekia 2–4 mm (3.8 pav. b)).

Remiantis ankstesniais tyrimais (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2016a), daugiakanalio ciklono išorinio ištisinio žiedinio plyšio plotis parinktas 30 mm, todėl kietųjų dalelių kaupimosi ant separavimo kameros dugno ties plyšiais pastebėta žymiai mažiau, tačiau daugiausia plyšiai yra užlipdomi medienos pelenų SDKD atveju (3.8 pav. c)). Yra manoma, kad medienos pelenų autoheziija, lyginant su kitomis kietosiomis dalelėmis, yra kiek mažesnė, tačiau kietosioms dalelėms sulipus arba joms prilipus prie paviršiaus, dujų srautas nesugeba jų atitraukti ir todėl jų kaupimasis sparčiai greitėja. Lignino ir medienos kietosios dalelės – priešingai, yra gana mažos masės, todėl srautu yra nunešamos net kartu sulipusios kietosios dalelės, taigi adhezija prie paviršių yra mažesnė.

Lyginant su ankstesniais tyrimais, esant 10 mm plyšio pločiui, plyšiai užsikimšdavo. Tyrimais nustatyta, kad, praleidus iki 30 000 m³ dulkėtų agresyviųjų dujų, t. y. apytiksliai po 30 darbo valandų, siekiant išvengti valymo įrenginio plyšio užsikimšimo, esamo segmentinių plyšių pločio pakanka. Kietųjų dalelių kaupimasis šiuo atveju nesukelia papildomų vietinių kliūčių dujų srauto judėjimui. Dujų srauto aerodinaminiai parametrai (greitis ir pasipriešinimas) kinta ne daugiau nei prietaisų (0,05 m/s ir 5 Pa) paklaidų ribose.



3.8 pav. Kietųjų dalelių adhezijos reiškinys juodojo metalo daugiakanaliame ciklone su cinkuotos skardos kreivalinijinais elementais ir separavimo kameros dugnu, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose:
a) lignino; b) medienos; c) medienos pelenų (šaltinis: autorius)

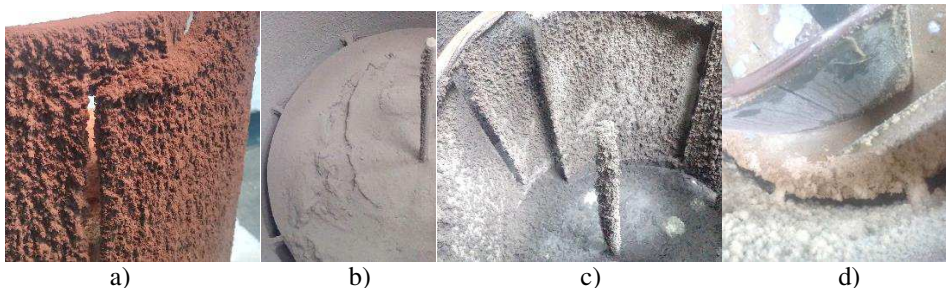
Fig. 3.8. Adhesion phenomenon of particulate matter in a black metal multi-channel cyclone with galvanized sheet crinkling elements and a separating chamber bottom after 150 000 m³ aggressive gas at 12 m/s average flow velocity into cyclone channel: a) lignin; b) wood; c) wood ash (source: author)

Galima daryti prielaidą, kad kietųjų dalelių adhezija prie vidinių separavimo kameros sienelių nežymiai sumažina paviršiaus glotnumą, nes pasireiškia autohezija ir pasikeičia dujų srauto trajektorija. Daroma prielaida, kad dujų srauto, kurio santykinis drėgnis daugiau nei 95 %, pirmojoje eksperimentinių tyrimų stadijoje (iki 30 000 m³ agresyviųjų dujų tūriui) įtaka daugiakanalio ciklono veikimui nežymi.

Toliau tęsiant ciklono tyrimus, nagrinėjant SDKD adheziją ciklono viduje, nustatyti adhezijos ir vis labiau pasireiškiančios autohezijos reiškiniai, praleidus iki 150 000 m³ agresyviųjų dujų, t. y. apytiksliai po 150 daugiakanalio ciklono darbo valandų (3.9 pav.).

Ant visų keturių ciklono kanalus sudarančių ketvirtadalio žiedo formos elementų sienelių galima matyti lignino SDKD sluoksnį (3.9 pav. a)) bei medienos pelenų SDKD (3.9 pav. c)) sluoksnį, kurio storis siekia iki 1–2 cm. Lignino kietųjų dalelių adhezija pastebima labiausiai iš išorinių ketvirtadalio žiedo formos elementų sienelių pusių – tai galima sieti su tuo, kad lignino kietosios dalelės

greitai įgeria esančią agresyviųjų dujų sraute drėgmę, todėl svorio veikiamos juda tik išoriniuose kanaluose, prilimpa prie paviršių arba yra nusodinamos bunkeryje.



3.9 pav. Didžiausios adhezijos pasireiškimas juodojo metalo daugiakanaliame ciklone su cinkuotos skardos kreivalinijiniais elementais ir separavimo kameros dugnu, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų: a) lignino kietųjų dalelių adhezija ant cinkuotos skardos ketvirtadalio žiedo formos elementų angų plokštelių atlenkimų; b) ir c) medienos pelenų kietųjų dalelių kaupimasis ant separavimo kameros dugno ir vidiniame centriniame kanale; d) medienos kietųjų dalelių adhezija pirmajame kanale (šaltinis: autorius)

Fig. 3.9. Particulate matter maximum occurrence of adhesion phenomenon in a black metal multi-channel cyclone equipped with a single inlet with galvanized sheet crinkling elements and a separating chamber bottom, after 150 000 m³ aggressive gas: a) lignin particle adhesion on openings slots with folded plate in the quarter-ring-formed elements; b) and c) an accumulation of wood ash particles on the bottom and in the internal central channel; d) wood particles adhesion in the 1st channel (source: author)

Medienos pelenų SDKD adhezija stebima visuose kanaluose – tiek išorinėje, tiek ir ant vidinės ketvirtadalio žiedo formos elementų sienelės pusės. Tai galima paaiškinti tuo, kad medienos pelenai yra didesnio tankio, todėl yra labiau hidrofobiškos (nors ir pagal struktūrą yra didesnio poringumo) kietosios dalelės (Crowe, Schwarzkopf, Sommerfeld & Tsuji, 2012). Tokiu būdu drėgmė, esanti agresyviųjų dujų sraute, kietąsias daleles veikia ne taip žymiai, tačiau kietųjų dalelių adhezija ant ciklono paviršių yra akivaizdi. Medienos SDKD adhezija yra didžiausia ties įtekėjimu į cikloną, nes kietųjų dalelių koncentracija šioje zonoje yra didžiausia.

Yra svarbu paminėti, kad medienos kietosios dalelės dėl savo savybių yra linkusios labai greitai sulipti su kitomis medienos kietosiomis dalelėmis. Sulipusių dalelių svoris yra didesnis nei pavienių, todėl jos yra lengviau išnešamos arčiau periferinės sienelės, veikiant išcentrinei jėgai. Tai galima pagrįsti tuo, kad didžioji dalis ketvirtadalio žiedo formos elementų paviršių tik nežymiai yra padengti kietųjų dalelių sluoksniais iki 5 mm. Periferinė sienelė, priešingai, yra

padengta didžiausiu sluoksniu iš visų nagrinėtų atvejų – apytiksliai 30–40 mm. Analizuojant lignino SDKD pastebėta, kad vidinė separavimo kameros sienelė apatinėje kanalų dalyje pasidengia 2–3 mm sluoksniu.

Ant periferinės sienelės pasireiškia adhezijos reiškiniai ir toliau tęsiasi autohezijs, t. y. kietųjų dalelių tarpusavio sulipimas susidariusioje adhezijos zonoje, dalį ketvirtadalio žiedo formos elementų paviršiaus ploto padengia 0,5–1 mm storio kietųjų dalelių sluoksnis. Tokį pasiskirstymą galima paaiškinti tuo, kad padidėja drėgme įsotintų garų srauto tankis. Lyginant su įprastomis sąlygomis laboratorijoje, tiesiogiai iš autoklavo išeinančio 145 °C temperatūros drėgno dujų srauto tankis padidėja daugiau nei 2,3 karto, tuo tarpu pasiekus daugiakanalį cikloną, ir atvėsus iki 75 °C, tankis yra lygus 1,242 kg/m³, t. y. skirtumas siekia apie 3 %, todėl toks srautas yra žemėjančios trajektorijos. Kadangi adhezija pasireiškia tam tikrose charakteringose ciklono zonose, prieinama prie išvados, kad santykinis drėgnis ir temperatūra, charakterizuojantys agresyviųjų dujų srautą, yra imituojami tinkamai, o jį sudarantis šaltinis (autoklavas su eksperimentiniu stendu) sudaro bendrą tinkamai veikiančią įrenginių sistemą. Autohezijs labiausiai pasireiškia, kai ant nagrinėjamo paviršiaus jau yra susiformavęs pirminis SDKD sluoksnis, tuo tarpu adhezija mažėja. Galima matyti, kad susiformavęs pirminis kietųjų dalelių plėvelės sluoksnis toliau kaupiasi ant pirminio kietųjų dalelių sluoksnio, sudarydamas antrines autohezijs zonas. Agresyviųjų dujų srautas, sudarytas iš įsotinto drėgme dujų srauto, dar labiau drėkina ir tuo pačiu sutvirtina susiformavusias kietųjų dalelių sankaupas, kurios sąlygoja daugiakanalio ciklono užsikimšimą. Susiformavęs sluoksnis pateiktas 3.9 paveiksle a, kai ketvirtadalio žiedo formos elemento angos yra beveik visiškai užlipdytos. Tokiu atveju tik iš dalies išvalytas dujų srautas pateks ne pro išpjautas angas, o tiesiogiai į vidinius kanalus ir kartu su kietosiomis dalelėmis bus pašalintas į aplinką, todėl valymo efektyvumas sumažės.

Ant separavimo kameros dugno, arti išorinio ištisinio plyšio, yra pastebimos didelės sankaupos kietųjų dalelių, kurios dėl didelės masės ir drėgnio negali būti nusodintos pro plyšį ir patekti į ciklono bunkerį (3.9 pav. b)). Lyginant ankstesnius tyrimus su 10 mm pločio segmentiniais žiediniais plyšiais (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2016a), galima teigti, kad šiuo atveju plotis yra pakankamas, tačiau yra būtini papildomi vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai, pro kuriuos galėtų būti nusodinamos susikaupusios ant separavimo kameros dugno kietosios dalelės vidiniame centriniame kanale.

Didžiausia adhezija ciklono viduje buvo pastebėta ant didelio kreivumo paviršių, t. y. ties angų plokštelių atlenkimais ketvirtadalio žiedo formos elementuose, ties įtekėjimu į pirmąjį ciklono kanalą. Vykstant adhezijai, ciklono elementų skerspjuvio plotas mažėjo ir tuo pačiu mažėjo dujų srauto pralaidumas, todėl galiausiai šie elementai užsikimšo. Kietųjų dalelių adhezija ne tik iš dalies

pakeitė konstrukcijos geometriją, tam tikrose zonose visiškai arba iš dalies užblo- kavusi dujų srauto tekėjimą, tačiau ir pakeitė esamų paviršių glotnumą.

Dėl pasidengusio SDKD sluoksnio pasikeitė dujų srauto trajektorijos. Tai galima pagrįsti tuo, kad susidariusi kietųjų dalelių sanakaupa ant separavimo ka- meros dugno orientuojasi ties tomis zonomis, prieš kurias ketvirtadalio žiedo for- mos elementų angos su atlenktomis plokštelėmis visiškai užsikimšo, t. y. trečiasis ir ketvirtasis ketvirtadalio žiedo formos elementai. Tai galima paaiškinti ir tuo, kad, tolstant nuo įtekėjimo, agresyviųjų dujų srautas netenka kinetinės energijos dėl kelio, kurį prateka ciklono kanalais, ir dėl to patiriamų papildomų slėgio nuos- tolių.

Remiantis daugiakanalio ciklono konstrukcija buvo patobulintas daugiakanalis ciklonas, norint sumažinti SDKD adheziją bei išvengti įrenginio užsikimšimo, šalinant SDKD iš agresyviųjų dujų srauto. Atlikti analogiški tyrimai, kai buvo tiriamas daugiakanalis ciklonas, panaudojant lignino, medienos ir medienos pelenų SDKD (3.10 pav.).

Nustatytas konstrukcijos pasidengimas kietosiomis dalelėmis, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, t. y. apytiksliai po 150 ciklono darbo valandų, kai dujų srauto temperatūra siekė 145 °C, o jo santykinis drėgnis – daugiau nei 95 %. Vidutinė kietųjų dalelių koncentracija siekė iki 5 g/m³.

Pastebėta, kad lignino SDKD adhezija labiausiai pasireiškia ant separavimo kameros sienelės ties antruoju įtekėjimu (antrinis srautas), kur kietųjų dalelių sluoksnis siekia 1–2 mm ir užima apytiksliai 50×50 mm plotą (3.10 pav. a)).

Tokį kietųjų dalelių kaupimąsi galima paaiškinti tuo, kad agresyviųjų dujų srauto trajektorija padaro pirmąjį posūkį 90° kampu ir į separavimo kamerą pa- tenka didesniu kampu nei liestinės su kameros vidiniu paviršiumi.

Ties pirmuoju dujų įtekėjimu nustatyta nežymi medienos pelenų SDKD adhezija, kur nustatytas apytiksliai 1 mm sluoksnio storis, kietosios dalelės padengė metalo paviršių per visą ciklono kanalo aukštį, tačiau zonos ilgis yra 1,5–2 cm. Ties kitais įtekėjimais kietųjų dalelių sluoksnis nustatytas dar mažesnis ir siekė ne daugiau nei 0,5 mm (3.10 pav. e)). Nustatyta, kad patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcijoje, įrengus vidinių kanalų segmentinius žiedinius persidengiančius plyšius išgaubtame separavimo kameros dugne, buvo sumažintas kietųjų dalelių kaupimasis vidiniame centriniame kanale. Lignino SDKD sanakaupos pastebimos tik palei išorinę ketvirtadalio žiedo formos elemento briauną ant dugno, apytiksliai 5 mm pločio juostoje, kur kietųjų dalelių sluoksnis nesiekia 0,5 mm (3.10 pav. c)).



3.10 pav. Kietųjų dalelių adhezijos reiškinys patobulintame nerūdijančio plieno daugiakanaliame ciklone: a), b) ir c) lignino kietųjų dalelių adhezija separavimo kameroje, ciklono vidiniame centriniame kanale ir ketvirtame ciklono kanale; d), e), f) medienos pelenų kietųjų dalelių adhezija ties įtekėjimu į pirmąjį ciklono kanalą, ant separavimo kameros dugno bei ant ketvirtadalio žiedo formos elemento su atlenkta plokšte; g), h), i) medienos kietųjų dalelių adhezija separavimo kameroje ant ketvirtadalio žiedo formos elemento vidinio paviršiaus ir ties įtekėjimu į pirmą ciklono kanalą, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

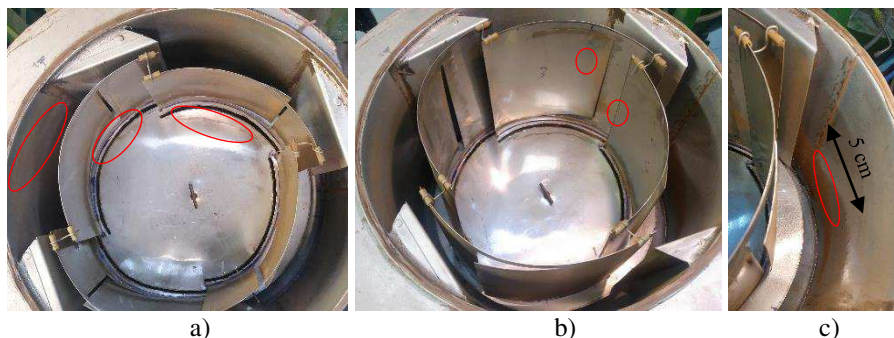
Fig. 3.10. Particulate matter adhesion phenomenon in the newly designed stainless steel multi-channel cyclone: a), b) and c) lignin particles adhesion in the separation chamber, the internal central cyclone's channel and the 4th cyclone's channel; d), e) and f) wood ash particles adhesion in the inlet to the 1st cyclone's channel, on the bottom of the separation chamber and on the quarter-ring-formed element with folded plate; g), h) and i) wood particles adhesion in the separation chamber, on the inner surface of quarter-ring-formed element and in the inlet to the 1st cyclone's channel after 150 000 m³ aggressive gas at 12 m/s average flow velocity into cyclone channel (source: author)

Medienos pelenų kietųjų dalelių ant dugno labiausiai prisikaupė ciklono vidiniame centriniame kanale, nuo įrenginio ašies link ketvirtąjo ketvirtadalio žiedo formos elemento palei vidinę briauną, kur sluoksnio storis siekia 0,5–1 mm (3.10 pav. d)).

Kaip galima matyti 3.3 paveiksle b) ir d) atvejais, SDKD adhezija ir autohezija ant ketvirtadalio žiedo formos elementų nėra reikšminga, didžiausias susidaręs sluoksnis buvo nustatytas ant elemento, kuris sudaro ketvirtąjį kanalą. Pastaruoju atveju kietosios dalelės padengė ketvirtadalio žiedo formos elemento (atlenktos 5° kampu plokštelės) 70 % paviršiaus ploto, o sluoksnio storis siekė 0,5–1 mm. Medienos pelenų SDKD pasidengė labiausiai ketvirtasis ketvirtadalio žiedo formos elementas – jo išorinė pusė, kur kietųjų dalelių sluoksnis vienas didžiausių ir siekia 1–3 mm (3.10 pav. f)). Tokią adheziją galima paaiškinti tuo, kad agresyviųjų dujų srauto greitis ketvirtajame kanale yra sumažėjęs, dėl to kietosios dalelės lengviau sukimba su paviršiumi. Įrengus ketvirtąjį dujų įtekėjimą, kuris papildė judantį dujų srautą iš ankstesnių kanalų ir tuo pačiu padidina vidutinį greitį ketvirtajame kanale, išvengta stipresnės adhezijos. Kitų paviršių pasidengimas SDKD sluoksniu nesiekė trečdaliaus jo ploto. Taip pat galima matyti (3.10 pav. b) ir d)), kad SDKD srauto trajektorija yra žemėjanti, todėl daroma prielaida, kad jos yra nukreipiamos į esamus plyšius dugne bei patenka į ciklono bunkerį. Todėl, lyginant su daugiakanalio ciklono atveju, galima teigti, kad lignino SDKD adhezija ir autohezija patobulintame daugiakanaliame ciklone buvo stipriai sumažinta.

Patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcijos vidiniai elementai buvo pagaminti iš nerūdijančio plieno, kuris pasižymi geru glotnumu. Šis veiksnys kartu su jau išvardytais sprendimais dar labiau sumažina SDKD adhezijos reiškinius – taip yra išvengiama patobulinto daugiakanalio ciklono elementų užsikimšimo. Todėl patobulintas daugiakanalis ciklonas gali būti taikomas ilgalaikiam dulkėto agresyviųjų dujų srauto valymui.

Buvo atlikti pakartotini eksperimentiniai patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais įtekėjimais tyrimai adhezijai nustatyti, kai jo vidiniai elementai buvo padengti karščiui ir dilimui atspariu laku. Pastebėtos žymiausios adhezijos zonos pateiktos 3.11 paveiksle. Ant lakuotų patobulinto daugiakanalio ciklono elementų separavimo kameros periferinės sienelės ir dugno bei ant ketvirtadalio žiedo formos elementų paviršių buvo pastebėtos tik nežymios pavienių kietųjų dalelių kaupimosi zonos, kurių storis nesiekė nei 0,1 mm, todėl jų įtakos įrenginio veikimui galima nepaisyti. Taip pat pastebėta (3.11 pav.c)), kad kietųjų dalelių trajektorijos, vos patekusios pro dujų srauto įtekėjimus, yra staigios žemėjančios trajektorijos. Kietųjų dalelių pėdsakai yra pastebimi vos 5 cm atkarpoje, esančioje virš separavimo kameros dugno, kai po šio atstumo trajektorija staigiai žemėja, todėl galima teigti, kad kietosios dalelės iškart patenka į bunkerį, t. y. nusodinamos.



3.11 pav. Lignino kietųjų dalelių adhezijos reiškinys patobulintame daugiakanaliame ciklone, kai nerūdijančio plieno vidiniai paviršiai buvo padengti laku: a) ant separavimo kameros periferinės sienelės ir dugno; b) ant ketvirtadaliao žiedo formos elementų su atlenkta plokšte; c) ties pirminiu dujų srauto įtekėjimu ant separavimo kameros, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Fig. 3.11. Lignin particulate matter adhesion phenomenon into newly designed multi-channel cyclone with varnished stainless steel inner surfaces: a) the peripheral wall and bottom of separation chamber; b) on the quarter-ring-formed element and folded plate; c) on the separation chamber at the primary gas flow inlet, in purifying 150 000 m³ of the polluted gas, at the average velocity of 12 m/s into cyclone channel (source: author)

Agresyviųjų dujų srauto valymas yra lydimas ne tik adhezijos proceso, bet ir papildomų teršalų, esančių dujų sraute poveikio dujų srauto parametrams ir kietųjų dalelių nusodinimui. Viena iš ciklono taikymo sričių yra medienos apdorojimo, dažymo, džiovinimo technologinės linijos, taip pat medienos SDKD šalinimas iš susidarančių užterštų oro–dujų srautų. Aukštos temperatūros ir drėgnio dujų srautas, chemiškai užterštas acetonu, gali turėti įtakos ciklono darbui, todėl labai svarbu įvertinti jo įtaką kietųjų dalelių šalinimo ciklone efektyvumui. Lakiųjų organinių junginių grupę sudaro daug organinių junginių, tačiau vieni iš dažniausiai aptinkamų medienos pramonėje teršalų emisijose yra acetonas, propanolis, butanolis, etanolis ir kt., kurie įeina į lakų ir dažų sudėtį, todėl vienas jų, acetonas, buvo pasirinktas eksperimentiniams tyrimams.

Atlikus eksperimentinius tyrimus, buvo gauti rezultatai, kurie įvertina acetono, kaip papildomo teršalo agresyviųjų dujų sraute, įtaką daugiakanalio ciklono efektyvumui (3.12 pav.). Rezultatai buvo gauti atskirais tyrimo etapais, t. y. esant skirtingam praleistam dujų tūriui – 1300 m³, 2600 m³ ir 3900 m³, o tai atitinka 1, 2 ir 3 daugiakanalio ciklono darbo valandas. Visais atvejais vidutinis dujų srauto greitis ciklono kanaluose buvo lygus 12 m/s.

Gauti tyrimų rezultatai parodė, kad tolygiai didėjant acetono koncentracijai agresyviųjų dujų sraute nuo 0 (esant acetonu neužterštam dujų srautui) iki 4 g/m^3 (1560 ppm), SDKD šalinimo efektyvumas tolygiai didėja nuo 86,4 % iki 88,5 %. Nustatyta valymo efektyvumo didėjimo tendencija acetono koncentracijai didėjant. Taip pat efektyvumas nežymiai didėja, kai nepertraukiamo daugiakanalio ciklono darbo laiko trukmė ilgėja, t. y. didėja praleistų dujų tūris.

Statistiškai analizuojant gautas valymo efektyvumo kیتimo priklausomybes nuo praleisto dujų tūrio, nustatyta, kad koreliacijos koeficientas visais atvejais yra didesnis nei 0,9966, o didžiausia vertė yra lygi 0,9979, esant 2 g/m^3 acetono koncentracijai. Vidurkinimo kreivių determinacijos koeficientai, esant tam pačiam praleistam dujų tūriui, kai acetono koncentracija buvo nuo 1 g/m^3 iki 3 g/m^3 , buvo 0,9982–0,9997. Valymo efektyvumas, praleidus 1300 m^3 agresyviųjų dujų, kito pagal eksponentinę priklausomybę (determinacijos koeficientas buvo didžiausias ir lygus 0,9982), tuo tarpu kitais atvejais – pagal logaritminę. Visų gautų valymo efektyvumo verčių imties standartinis nuokrypis lygus 0,66. Priimant šią vertę, kaip galimą metodo paklaidą, 3,5 paveiksle galima matyti, kad dalis rezultatų esant 1 g/m^3 acetono koncentracijai patenka į šį intervalą. Kitų tyrimų rezultatų vertės nepatenka į galimos paklaidos intervalą, todėl jais remiantis galima pagrįsti acetono įtaką valymo efektyvumui.

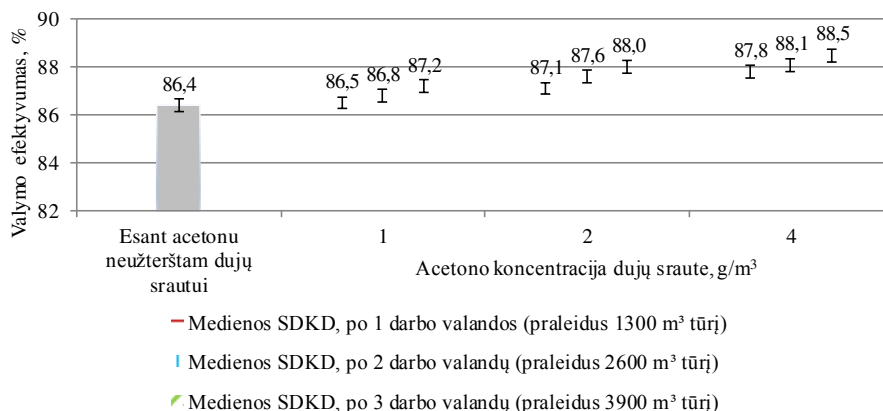
Esant mažiausiai iš pasirinktų – 1 g/m^3 (391 ppm) acetono koncentracijai, valymo efektyvumas padidėja nežymiai ir tik po 3 darbo valandų skirtumas pasiekia daugiau nei 0,8 %. Tuo tarpu acetono koncentracijai esant 2 g/m^3 valymo efektyvumas padidėjo vidutiniškai 0,7 %, o esant 4 g/m^3 – 1,3 %.

Galima teigti, kad pirmųjų dviejų valandų valymo efektyvumo vertės tarpusavyje skiriasi 0,3–0,5 %. Skirtumas tarp pastarųjų verčių ir trečiosios valandos nustatytos vertės yra didžiausias esant 1 g/m^3 acetono koncentracijai, tuo tarpu, esant acetono koncentracijai 2 g/m^3 ar 4 g/m^3 skirtumas buvo lygus 0,4 %.

Galima daryti prielaidą, kad agresyviųjų dujų sraute medienos kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo daugiakanaliame ciklone didėjimo priežastis yra ta, kad dujų sraute atsirandant acetonui mažėja dujų mišinio klampa, lyginant su acetonu neužterštu agresyviųjų dujų srautu. Kietųjų dalelių nusodinimo tikimybė ciklonuose yra atvirkščiai proporcinga dujų dinaminei klampai. Acetono garų dalis bendrame dujų sraute sumažina jo klampą bei padidina kietųjų dalelių nusodinimo efektyvumą. Pagal anksčiau atliktus tyrimus (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2018) nustatyta, kad, esant 100°C temperatūrai ir 95 % santykiniam drėgniui, agresyviųjų dujų–garų srauto klampa lygi $2,125 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, t. y. 18 % daugiau nei esant neagresyviųjų dujų srautui (20°C temperatūrai ir 50 % santykiniam drėgniui). Kai dujų–garų mišinį sudaro ne tik agresyviųjų dujų srautas, bet ir acetono garai, jų koncentracijai siekiant 4 g/m^3 , dinaminė klampa sumažėja iki 0,5 %.

Sprendžiant apie galimą kitų LOJ teršalų įtaką daugiakanalio ciklono kietųjų dalelių šalinimui įvairių technologinių procesų metu, galima teigti, kad tendencija

išliktų panaši, nes LOJ, išsiskiriančių dėl dažų, lakų panaudojimo ar kitose medienos apdorojimo procesuose (dažymo, impregnavimo ir kt.) tankis ir dinaminė klampa yra panašūs, todėl poveikis agresyviųjų dujų srautui bei kietosioms dalelėms bus panašus.



3.12 pav. Smulkiadispersių medienos kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo iš agresyviųjų dujų srauto priklausomybės nuo acetono koncentracijos dujų sraute, esant skirtingam praleistam dujų tūriui, kai vidutinis dujų srauto greitis patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose buvo 12 m/s (šaltinis: autorius)

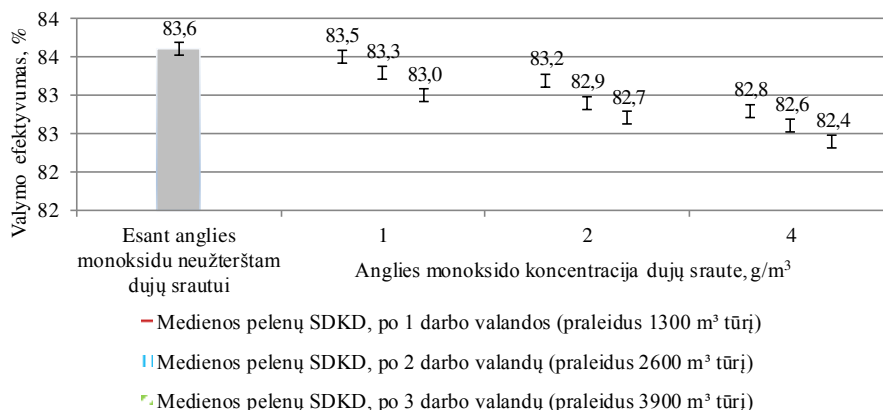
Fig. 3.12. The dependence of the removal efficiency of wood fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow on the concentration of acetone in gas flow, at the different passed gas flow, when an average flow velocity in the newly designed multi-channel cyclone's channels was equal to 12 m/s (source: author)

Buvo atlikti tyrimai, kuriais buvo siekiama nustatyti degimo metu išsiskiriančių dujinių teršalų įtaką patobulinto daugiakanalio ciklono valymo efektyvumui. Degimo procesui imituoti mažos galios katile buvo deginamas biokuras, o dujų–dūmų srautas buvo tiekiamas į eksperimentinį stendą ventiliatoriumi. Buvo analizuojamos anglies monoksido koncentracijos dujų sraute bei ištirtas medienos pelenų šalinimo efektyvumo kitimas taikant daugiakanalį cikloną (3.13 pav.). Anglies monoksidas buvo pasirinktas kaip teršalas, kurio cheminės ir fizikinės savybės gali turėti daugiausia įtakos kietųjų dalelių šalinimo efektyvumui.

Kaip ir ankstesniuose tyrimuose, analizuojant acetono įtaką ciklono valymo efektyvumui, tyrimas buvo atliekamas atskirais etapais, praleidus 1300 m³, 2600 m³ ir 3900 m³ agresyviųjų dujų.

Priešingai nei acetonu užterštam agresyviųjų dujų srautui, anglies monoksido koncentracijai dujų sraute didėjant, valymo efektyvumas nežymiai sumažėja nuo

83,6 % (esant CO neužterštam dujų srautui) iki 82,4 % (esant 4 g/m³ koncentracijai).



3.13 pav. Smulkiadispersių medienos pelenų kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo iš agresyviųjų dujų srauto priklausomybės nuo anglies monoksido koncentracijos dujų sraute, esant skirtingam praleistam dujų srautui, kai vidutinis dujų srauto greitis naujos konstrukcijos daugiakanalio ciklono kanaluose buvo 12 m/s (šaltinis: autorius)

Fig. 3.13. The dependence of the removal efficiency of wood ash fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow on the concentration of carbon monoxide in gas flow, at the different passed gas flow, when an average flow velocity in the newly designed multi-channel cyclone's channels was equal to 12 m/s (source: author)

Pastebėta, kad CO įtaka valymo efektyvumui nėra reikšminga esant 1 g/m³ koncentracijai, nes pokytis nustatytas tyrimų metu kinta tik 0,2 %. Esant 2 g/m³ ir 4 g/m³ anglies monoksido koncentracijai bei praleidus ne mažiau nei 2600 m³ agresyviųjų dujų (2 darbo valandos), skirtumas su chemiškai neužteršto dujų srauto valymo efektyvumu siekia virš 1 %. Taip pat svarbu paminėti, kad valymo efektyvumui turi daugiau įtakos CO koncentracija nei praleistas chemiškai užterštas agresyviųjų dujų srautas.

Gautų rezultatų standartinis nuokrypis siekia 0,35, o dispersija – 0,125. Variacijos koeficientas buvo apytiksliai 2 kartus mažesnis nei acetonu užteršto dujų srauto tyrimuose ir lygus 0,43 %. Remiantis šiais parametrais galima teigti, kad anglies monoksido įtaka valymo efektyvumui yra mažesnė. Paklaidų ribose (0,1–0,3 %) kinta vertės, kai anglies monoksido koncentracija kito 1–2 g/m³, praleidus 1300 m³ agresyviųjų dujų, bei, esant 1 g/m³ anglies monoksido koncentracijai, praleidus 2600 m³ agresyviųjų dujų.

Anglies monoksidu užteršto dujų srauto valymo efektyvumo pokytį galima pagrįsti tuo, kad, priešingai nei acetono garai, anglies monoksidas padidina dujų srauto klampą, lyginant su CO neužterštu dujų srautu. Esant 4 g/m^3 anglies monoksido koncentracijai agresyviųjų dujų sraute, bendra dinaminė dujų mišinio klampa padidėja tik 0,05 %, todėl jos įtaka valymo efektyvumui nežymi.

3.3. Paviršiaus glotnumo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Pagrindiniams nagrinėjamų metalų paviršių glotnumo rodikliams nustatyti buvo naudojamas profilometras. Skirtingų metalų paviršių žymėjimas buvo toks: 1 – cinkuota skarda, 2 – cinkuota skarda po šlifavimo smėliasrove, 3 – lakuota cinkuota skarda, 4 – nerūdijantis plienas, 5 – nerūdijantis plienas po šlifavimo smėliasrove, 6 – lakuotas nerūdijantis plienas, 7 – juodasis metalas, 8 – juodasis metalas po šlifavimo smėliasrove, 9 – lakuotas juodasis metalas. Detali cinkuotos skardos, nerūdijančio plieno ir juodojo metalo paviršiaus glotnumo analizė pateikta B priede.

Gauti nerūdijančio plieno paviršiaus glotnumo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Nerūdijančio plieno paviršiaus glotnumas buvo visais atvejais didesnis, palyginti su cinkuota skarda. Pavyzdžiui, šlifavimo smėliasrove atveju nerūdijančio plieno profilio aritmetinis nuokrypis buvo 65,0 % ir 48,9 % mažesnis nei atitinkamai cinkuotos skardos ir juodojo metalo atvejais.

3.3 lentelė. Nerūdijančio plieno paviršiaus glotnumas (šaltinis: autorius)

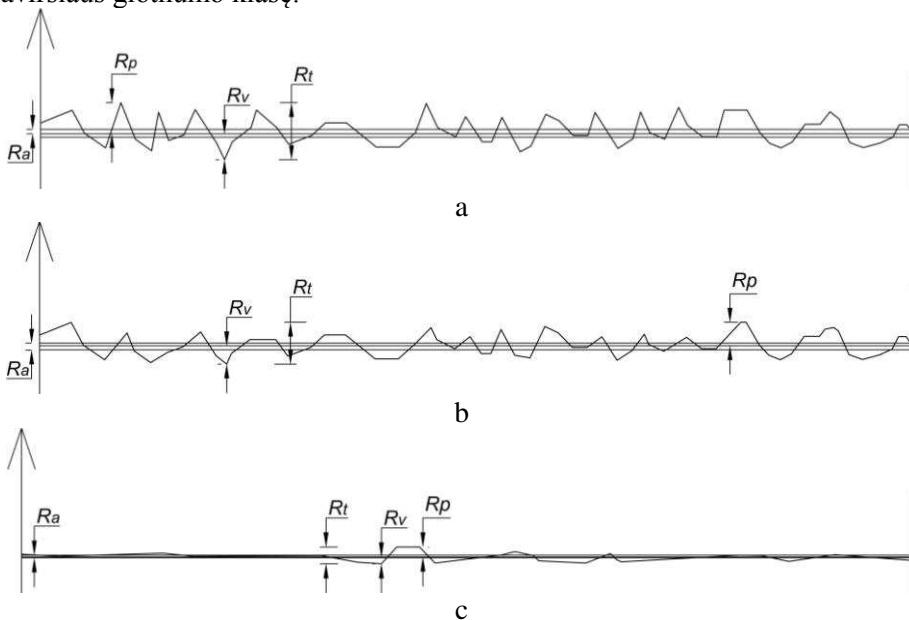
Table 3.3. Stainless steel surface smoothness (source: author)

Paviršiaus glotnumo parametras	Metalo paviršiaus glotnumas, μm		
	Nerūdijantis plienas	Nerūdijantis plienas po šlifavimo smėliasrove	Lakuotas nerūdijantis plienas
<i>Ra</i>	0,273	0,233	0,089
<i>Rq</i>	0,425	0,363	0,139
<i>Rz</i>	3,526	3,009	1,150
<i>Rt</i>	1,989	1,473	0,578
<i>Rp</i>	1,086	0,827	0,346
<i>Rv</i>	0,903	0,645	0,232

Įvertinus visus paviršiaus glotnumo parametrus, galima matyti, kad profilyje nėra reikšmingų požymių, kurie liudytų apie paviršiaus nelygumus. Didžiausias iškilimo ir įdubos aukštis apytiksliai lygūs, o jų vertė, esant neapdorotam paviršiui (3.11 pav. a)), kito $0,9\text{--}1,1\text{ }\mu\text{m}$ intervale, t. y. mažiau nei šlifuoto smėliasrove cinkuotos skardos paviršiaus (3.11 pav. b)).

Nerūdijančio plieno paviršių apdorojus smėliasrove, paviršiaus glotnumas padidėja nežymiai – apie 14 %. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad neapdorotas paviršius pasižymi nedideliu šiurkštumu, todėl pasiekti didesnį glotnumą yra sudėtinga. Tačiau paviršių apdorojus tokiu būdu, reikšmingai sumažėja rodikliai, nusakantys įdubų ir iškilimų dydį, o tai pagerina paviršiaus savybes, norint išvengti kietųjų dalelių adhezijos. Lakuoto nerūdijančio plieno profilis pateiktas 3.11 paveiksle c).

Lakuoto nerūdijančio plieno atvejis yra optimalus, vertinant visus nagrinėtus paviršius ir jų apdorojimo būdus. Pastaruoju atveju paviršiaus vidutinis aritmetinis vidurkis nesiekė $0,1\text{ }\mu\text{m}$, o tai yra ypač maža vertė, charakterizuojanti aukštą paviršiaus glotnumo klasę.



3.11 pav. Nerūdijančio plieno paviršiaus profilis: a – neapdorotas; b – po šlifavimo smėliasrove; c – lakuotas (šaltinis: autorius)

Fig. 3.11. Surface profile of factory stainless steel: a – raw; b – sandblast grinded; c – varnished (source: author)

Kaip pavaizduota 3.11 paveiksle c), profilyje nustatytos tik kelios nelygumų zonos, kurios tik nežymiai išsiskyrė su bendru paviršiaus vidurkiu. Apie aukštą glotnumo lygį galima spręsti ir pagal kitus nustatytus rodiklius. Didžiausios įdubos ir iškilimo vertės sumažėjo apytiksliai 71 %, lyginant su neapdoroto metalo paviršiaus atveju. Bendras nelygumų aukštis buvo panašus cinkuotos skardos atveju bei 44 % mažesnis nei lakuoto juodojo metalo atveju.

Remiantis gautais rezultatais galima teigti, kad neapdorotas cinkuotos skardos paviršius yra šiurkštesnis nei paviršius po šlifavimo bei tuo labiau, kai yra padengtas laku. Vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis siekė 1,3 μm , po šlifavimo smėliarove šio paviršiaus nuokrypio vidurkis buvo 49 % mažesnis, o padengus laku – sumažėjo beveik 89 %.

Vertinant metalų paviršių vidutinį aritmetinį profilio nuokrypį, nustatyta, kad juodasis metalas užėmė tarpinę poziją tarp optimalaus nerūdijančio plieno ir cinkuotos skardos paviršių. Gauti rezultatai parodo tai, kad šio tipo metalo paviršius yra pakankamai glotnus net jo neapdorojus (3.11 pav. a)), tačiau jo šlifavimas, panaudojant smėliarovę, padidino glotnumą 24 % (3.11 pav. b)).

Apibendrinant visus nagrinėtus atvejus galima prieiti prie išvados, kad optimaliam atvejui pasiekti patobulinto daugiakanalio ciklono paviršiai turi būti pagaminti iš nerūdijančio plieno metalo bei padengti laku. Didelį glotnumą charakterizuojantys rodikliai taip pat buvo pasiekti lakuotos cinkuotos skardos paviršiaus atveju. Ištyrus metalų paviršius be apdorojimo, nustatyta, kad didžiausias glotnumas buvo bandinio iš nerūdijančio plieno. Metalų paviršiaus šlifavimas, pasinaudojant smėliarove, labiausiai padidino glotnumą cinkuotos skardos metalo (2 kartus), mažiausiai (1,2 karto) – nerūdijančio plieno atveju. Padengus laku, cinkuotos skardos paviršiaus glotnumas padidėjo labiausiai (9 kartus), mažiausiai (2,4 karto) – juodojo metalo.

3.4. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto greičio tyrimų rezultatai ir jų analizė

Daugiakanalio ciklono dujų srauto greičio tyrimai atlikti su keturkanaliu ciklonu, panaudojant ketvirtadalio žiedo formos elementus su 5° kampo angų plokštelių atlenkimais. Norint ištirti greičių pasiskirstymą ciklono kanaluose, vidutinis dujų srauto greitis ciklone buvo palaikomas lygus 8 m/s, 12 m/s, 16 m/s. Kreivalinijiniai ketvirtadalio žiedo formos elementai ciklono separavimo kameroje buvo išdėstyti 50 / 50 padėtyje. Tokiu būdu kreivalinijinių ketvirtadalio žiedo formos elementų tarpuose ateinantis iš kanalo srautas dalijasi į periferinį (grįžtamojo) bei tranzitinį (judančio į sekantį kanalą) srautą, periferinį bei tranzitinį srautą sudaro 50 % bendro ateinančio srauto, t. y. srautų pasiskirstymo santykiai yra lygūs tarpusavyje.

Cilindrinio korpuso ciklone įrengus cilindrinis kreivalinijinius ketvirtadalio žiedo formos elementus, jie išdėstomi spindulių mažėjimo tvarka bei atitraukiami atsižvelgiant į įtekėjimo plotį. Dėl tokio išdėstymo bei savitos ciklono konstrukcijos kanalų pabaiga yra mažėjančio skerspjūvio plotas.

Dujų srauto greičių keturkanaliame ciklone pasiskirstymo tyrimams buvo nustatytas tiekiamų dujų srauto greitis taip, kad vidutinis dujų srauto greitis ciklono kanaluose būtų lygus 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, greitis ortakyje prieš cikloną siekė 12,5 m/s, o po ciklono 12,3 m/s, o praleisti debitai atitinkamai lygūs 905 m³/val. ir 890 m³/val. Vertinant galimą tyrimų įrangos 5 % paklaidą, galimas nuokrypis lygus ± 45 m³/val. Šiam atvejui esant, vidutiniai greičiai kiekviename iš ciklono kanalų kito nuo 11,3 m/s iki 13,2 m/s. Kaip ir atveju esant 16 m/s greičiui, didžiausias greitis nustatytas pirmojo kanalo pabaigoje – 14,9 m/s. Mažiausios vertės nustatytos trečiojo bei ketvirtojo kanalų pradžioje, kai atitinkamai buvo pasiektos 9,8 m/s ir 7,8 m/s vertės. Išsami analizė buvo publikuota autoriaus mokslo straipsnyje (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2018).

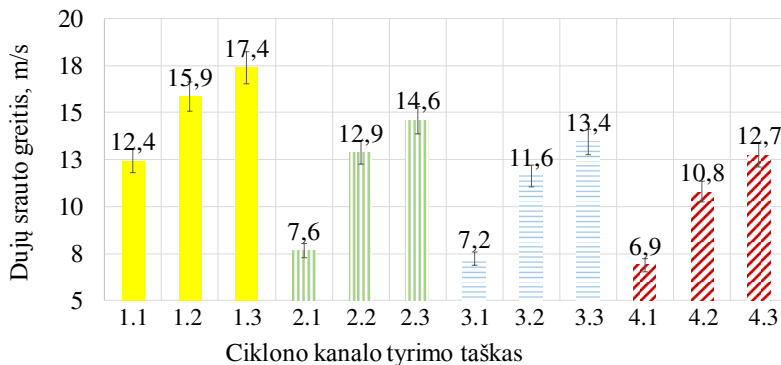
Vienas didžiausių greičių buvo nustatytas ketvirtojo kanalo, kuris lygus 14,5 m/s, pabaigoje. Vertinant visas nustatytų greičių vertes, esant vidutiniam 12 m/s greičiui, galima teigti, kad pokytis tarp didžiausios ir mažiausios verčių yra vienas mažiausių – 1,91 karto. Todėl galima prieiti prie išvados, kad greičiai visuose ciklono kanaluose kinta tolygiai, be staigių pokyčių.

Esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui kanaluose, dujų srauto greitis ortakyje prieš cikloną siekė 16,4 m/s, o po ciklono – 16,3 m/s, o praleisti debitai atitinkamai lygūs 1190 m³/val. ir 1180 m³/val. Didžiausias dujų srauto greitis nustatytas 1-jame kanale paskutiniame matavimo taške – 19,9 m/s. Tuo tarpu ketvirtojo kanalo pabaigoje greitis 2 % mažesnis ir lygus 19,5 m/s. Mažiausias greitis ciklone nustatytas ketvirtojo kanalo pradžioje, kuris buvo lygus 10,5 m/s. Dujų srautui ištekančiam iš trečiojo kanalo į ketvirtąjį, skerspjūvio plotas padidėja 34 %, tačiau judant 4-ojo kanalo pabaigos link, kanalo skerspjūvis sumažėja 1,97 karto.

Dujų srauto greičiui ciklono kanaluose esant 8 m/s, greitis ortakyje prieš cikloną siekė 9,2 m/s, po ciklono – 8,9 m/s, o praleisti debitai atitinkamai lygūs 670 m³/val. ir 640 m³/val. Didžiausias nustatytas dujų srauto greitis ciklone, esant 8 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui kanaluose, nustatytas pirmojo kanalo 3-jame taške, vertė buvo lygi 10,1 m/s. Galima prieiti prie išvados, kad esant 8 m/s greičiui, esantis trečiajame ir ketvirtajame ciklono kanaluose dujų srautas galėtų būti nepakankamas, nes veikiančios išcentrinės jėgos nesugebės išnešti kietųjų dalelių prie periferinės sienelės, be to, SDKD nepateks pro segmentinius plyšius į ciklono bunkerį.

Analogiškai tyrimams, atliktiems su daugiakanaliu ciklonu, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, buvo atlikti tyrimai, nustatant dujų srauto greičių pasiskirstymą patobulintame daugiakanaliame ciklone.

Esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose, greičiai atskiruose kanalų taškuose kito 6,9–17,4 m/s intervale (3.12 pav.).



3.12 pav. Dujų srauto greičių pasiskirstymas patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose, esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Fig. 3.12. Gas flow velocity distribution in the channels of newly designed multi-channel cyclone at the average velocity of 12 m/s in the cyclone's channels (source: author)

Praleisti dujų tūrio srautai per įtekėjimus buvo lygūs: į pirmą įtekėjimą – 470 m³/val., į antrą – 290 m³/val., į trečią – 270 m³/val. ir į ketvirtą – 260 m³/val. Suminis debitas, praleistas per visus įtekėjimus, buvo lygus 1290 m³/val. Esant galimai tyrimų įrangos 5 % paklaidai, rezultatų nuokrypis lygus ±65 m³/val. Šiuo atveju greitis ortakyje prieš cikloną siekė 17,8 m/s, po ciklono – 17,6 m/s, o praleisti debitai atitinkamai lygūs 1290 m³/val. ir 1275 m³/val. Patobulinto daugiakanalio ciklono antriniai įtekėjimai palaikė tolygų srauto pasiskirstymą visuose ciklono kanaluose, o dujų greitis kito 6,9–17,4 m/s intervalu.

Toks pasiskirstymas naudingas tuo, kad išcentrinės jėgos dydis išlieka pastovus visuose ciklono kanaluose, todėl nebus aptikti atsirandantys papildomi sūkūriniai (turbulentiniai) srautai. Pastarieji mažina SDKD nusodinimą – SDKD juda netinkama trajektorija, nėra nukreipiamos link nusodinimo plyšių, arba patekusios į bunkerį yra pakeliamos bei išnešamos pro išmetamąjį ortakį kartu su dujų srautu. Statistiškai apdorojus tyrimų rezultatus galima teigti, kad kitimo tendencija išlieka panaši visuose ciklono kanaluose. Gauti koreliacijos koeficientai tarp pirmo-antro, antro-trečio ir trečio-ketvirto kanalų yra panašūs ir lygūs 0,9981–0,9992. Stipriausias ryšys tarp verčių kitimo nustatytas tarp dujų srauto greičio verčių paskutiniuose dviejuose kanaluose. Įvertinus visus šiuos privalumus, yra priimama, kad optimalus dujų srauto greitis ciklono kanaluose yra lygus 12 m/s.

Esant didžiausiam iš pasirinktųjų greičių (16 m/s), greitis ortakyje prieš cikloną siekė 24,8 m/s, o po ciklono – 24,7 m/s, praleisti debitai atitinkamai lygūs

1795 m³/val. ir 1790 m³/val. Didžiausias greitis buvo nustatytas pirmojo kanalo pabaigoje (1.3 taškas), tuo tarpu mažiausias dujų greitis – ketvirtojo kanalo pradžioje. Tai galima paaiškinti tuo, kad patobulinto daugiakanalio ciklono kanalų skerspjūvio plotas nežymiai mažėja artėjant jų pabaigos link. Dujų srauto greičių pasiskirstymui visuose kanaluose turi įtakos ir kiekvienas iš įrengtų antrinių įtekėjimų. Pro kiekvieną iš šių įtekėjimų, įrengtų kas 90°, praleistas dujų srautas papildė bendrą valomą dujų srauto tūrį ciklone. Buvo apskaičiuotas per kiekvieną iš įtekėjimų praleistas debitas: į pirmą įtekėjimą – 600 m³/val., į antrą – 430 m³/val., į trečią – 390 m³/val. ir į ketvirtą – 375 m³/val. Suminis debitas, praleistas pro visus įtekėjimus, buvo lygus 1795 m³/val.

Esant 8 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose, dujų srauto greičio vertės kito pakankamai siaurame intervale – 5,3–11,3 m/s. Greičiai pirmame kanale buvo didžiausi ir skyrėsi nuo greičių kituose kanaluose apytiksliai 32,6 %, 25 % ir 18,9 % atitinkamai matavimo taškuose Nr. 1, 2 ir 3. Praleisti debitai pro įtekėjimus buvo lygūs: į pirmą įtekėjimą – 305 m³/val., į antrą – 205 m³/val., į trečią – 210 m³/val. ir į ketvirtą – 200 m³/val. Suminis debitas, praleistas pro visus įtekėjimus, buvo lygus 910 m³/val. Šiuo atveju greitis ortakyje prieš cikloną buvo lygus 12,6 m/s, o po ciklono – 12,5 m/s, praleisti debitai atitinkamai lygūs 910 m³/val. ir 905 m³/val.

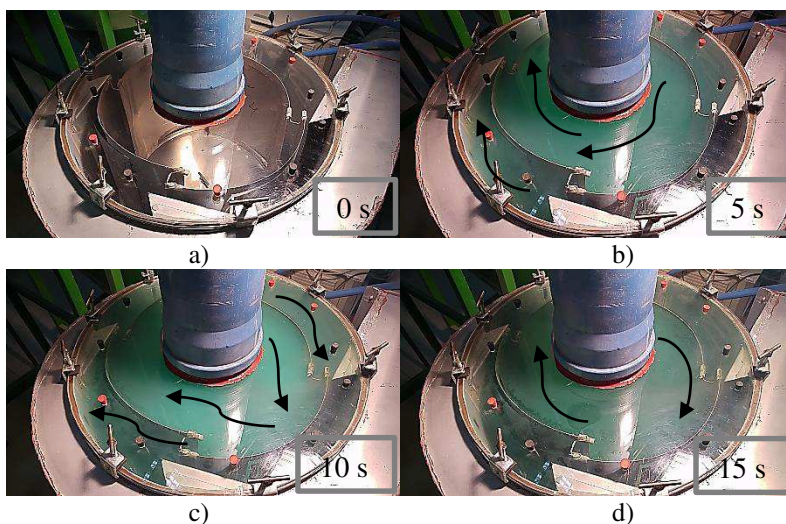
Apibendrinant visus išnagrinėtus atvejus, galima prieiti prie išvados, kad dujų srautas visais atvejais kinta gana tolygiai, taigi 16 m/s dujų greičio atveju pokytis tarp didžiausios ir mažiausios vertės buvo lygus 2,32, esant 12 m/s atvejui – 2,52, o 8 m/s greičio atveju – 2,13 karto. Galima daryti prielaidą, kad esant 8 m/s dujų greičiui, 2.1, 3.1 ir 4.1 taškuose gali būti nepakankamas srautas agresyviųjų dujų srauto judėjimui. Todėl prie įtekėjimų gali kauptis įtekančios kartu su srautu SDKD, o tai sukels adhezijos ir autohezijos reiškinius ir ciklono užsikimšimą. Siekiant išvengti adhezijos, yra pasirinkta tolesnius tyrimus atlikti, taikant optimalų 12 m/s dujų greitį.

Esant nedideliame dujų srauto greičiui, SDKD šalinimas iš užteršto dujų srauto nebus efektyvus, kadangi atitekančio iš ankstesnio kanalo švaraus dujų srauto greitis bus pernelyg mažas tam, kad būtų galima filtruoti naujai įtekančią užterštą dujų srautą. Taip pat SDKD esant mažam dujų srauto greičiui negalės būti nukreiptos į segmentinius plyšius, o kaupsis ant separavimo kameros dugno, ir tai sudarys papildomą ciklono kanalų užsikimšimą.

Atlikti tyrimai, panaudojant patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukciją, kai separavimo kameros dugne nebuvo įrengti vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai, o tik išorinis ištinis žiedinis plyšys. Tokiu atveju greitis ortakyje prieš cikloną nežymiai sumažėjo 0,8–3,2 %, o po ciklono – 1,2–4,0 %. Prieita prie išvados, kad toks sumažėjimas įvyksta dėl pasikeitusių dujų srauto trajektorijų, o tai padidino aerodinaminį pasipriešinimą, kuris slopina tiek įtekančią, tiek ir ištekančią iš ciklono dujų srautą.

Įleidus dūmų srautą pro bendrą ortakį, patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais ciklono vidinėje konstrukcijoje buvo nustatytos dujų srauto trajektorijos. Ciklono kanaluose buvo stebimas dūmų judėjimas atskirais laikotarpiais. Įleistų dūmų srauto trajektorijos ciklono kanaluose yra pateiktos 3.13 paveiksle.

Po dūmų įleidimo (3.13 pav. a)) pasireiškia dujų srautų turbulentiškumas, apie kurį liudija spalvos intensyvumas, ypač tai akivaizdu centriniame kanale. Ciklono kanaluose dujų srauto trajektorijos yra artimos laminariniam tekėjimui, tačiau ties ketvirtadalio žiedo formos elementų briaunomis bei zonoje už šiuose elementuose esančių atlenktų plokštelių pasireiškia sūkurių, kurie sukelia toliau judančią turbulentinio pobūdžio trajektoriją. Iš centrinio kanalo dujų srautas įgauna trajektoriją, būdingą periferiniam, t. y. grįžtančiam srautui. Tuo metu srautas, judantis išoriniuose kanaluose, įtekant pro pirminį ir antrinius įtekėjimus iš pradžių nukreipiamas ties periferine sienele, o vėliau juda išilgai kanalo centro linijos. Praėjus 10 s periodui, galima matyti, kad dūmų spalvos intensyvumas padidėja, tai rodo, kad dalis srauto toliau judėjo kanalais, bet nebuvo iškart pro išeinančio srauto ortakį pašalinta (3.13 pav. b)–c)).



3.13 pav. Dujų–dūmų srauto trajektorijos patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose, po įleidimo praėjus : a) 0 s; b) 5 s; c) 10 s; d) 15 s (šaltinis: autorius)

Fig. 3.13. Gas–smoke flow paths in the channels of newly designed multi-channel cyclone after injection has passed: a) 0 s; b) 5 s; c) 10 s; d) 15 s (source: author)

Judėjimo trajektorijos išliko panašios, tačiau šiuo atveju dėl didesnio dujų tūrio, o tuo pačiu ir dujų srauto greičio, padidėjo išcentrinės jėgos. Dėl to dujų

srautas išsilygino kanaluose ir periferinis srautas buvo lygus tranzitiniam, o tai atitinka 50 / 50 dujų srautų pasiskirstymo santykio atvejį. Tai naudinga, nes ciklono kanaluose judantis dulkėtas srautas yra labiau išvalomas, vykstant filtravimo procesui, kai SDKD išsilaiko ilgiau separavimo kameroje, kur ir nusodinamos pro žiedinius plyšius į bunkerį.

Tyrimo paskutiniajame etape (3.13 pav. d)), nutraukus dūmų tiekimą, akivaizdu, kad dūmai iš išorinių kanalų buvo pašalinti visiškai, tuo metu aplink ciklono ašį centriniame kanale buvo nustatytos žiedinės trajektorijos. Galima manyti, kad didelis dujų srauto greitis lemia labiau periferinio dujų srauto papildymą, kuris nukreipė dalį dūmų į išorinius kanalus.

Ivertinus dūmų judėjimo pobūdį patobulintame daugiakanaliame ciklone, galima numatyti, kad SDKD judėjimas turės panašių tendencijų su sąlyga, kad kietųjų dalelių tankis yra didesnis, todėl veikiant išcentrinėms bei svorio jėgoms SDKD srautas bus žemėjančios trajektorijos ir didžioji SDKD dalis pateks į periferinį srautą, kur jos bus atskirtos iš agresyviųjų dujų srauto ir nusodintos bunkeryje.

3.5. Patobulinto daugiakanalio ciklono agresyviųjų dujų srauto slėgių tyrimų rezultatai ir jų analizė

Daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, agresyviųjų dujų srauto slėgių tyrimuose buvo išanalizuotas statinio slėgio ir aerodinaminio pasipriešinimo kitimas esant vidutiniam agresyviųjų dujų srauto greičiui 8–16 m/s intervale. Aerodinaminio pasipriešinimo tyrimų rezultatuose pateikti atvejai esant neagresyviųjų bei esant agresyviųjų dujų srautui. Išsami analizė buvo publikuota autoriaus mokslo straipsnyje (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2018).

Tiriant keturkanalio ciklono aerodinaminį pasipriešinimą, nustatyta, kad, esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose bei tolygiam periferinio ir tranzitinio oro srautų santykio atvejui – 50 / 50, esant neagresyviųjų dujų srautui yra sukuriamas didžiausias aerodinaminis pasipriešinimas, kuris siekia 370 Pa. Esant agresyviųjų dujų srautui, vertės 9,8 % padidėjo bei siekė 410 Pa.

Prienama prie išvados, kad papildomą pasipriešinimą sukuria trinties jėgos, dujų srautui praeinant pro dujų–garų susiformavusius debesis. Tai paaiškinama tuo, kad didėjant dujų srauto temperatūrai, dinaminis slėgis, kaip ir greitis, proporcingai mažėja. Palaikant atitinkamą greitį ciklono kanaluose, buvo nustatyta, kad esant 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, aerodinaminio pasipriešinimo vertės, lyginant su 16 m/s atveju, sumažėja 2,1 karto ir 2,24 karto atitinkamai esant agresyviųjų ir neagresyviųjų dujų srautams. Daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, tiriant agresyviųjų

dujų srautą, nustatyta, kad statinis slėgis įtekėjime padidėjo apytiksliai 5,8 %, lyginant su atveju esant neagresyviųjų dujų srautui.

Skirtumas tarp pasipriešinimo verčių, esant skirtingai aplinkai, sudaro vidutiniškai 15,4 %, t. y. 30 Pa. Visais atvejais tendencija išlieka panaši – ciklono aerodinaminis pasipriešinimas esant neagresyviųjų dujų srautui yra mažesnis, nei esant agresyviųjų dujų srautui. Mažiausios vertės nustatytos esant 8 m/s dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, kai agresyviųjų dujų srauto atveju ciklono pasipriešinimas siekė 105 Pa, tuo tarpu esant neagresyviųjų dujų srautui – 85 Pa.

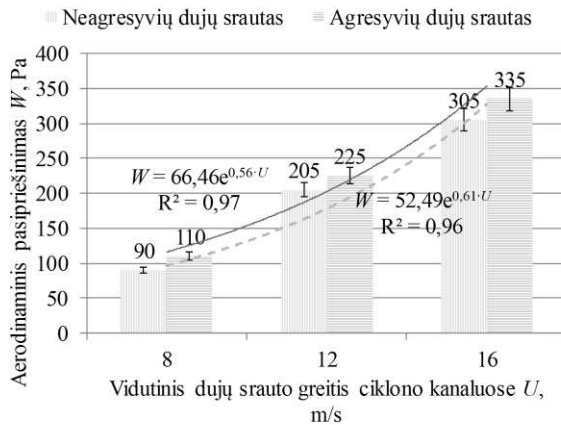
Apibendrinant tyrimų atvejus, galima prieiti prie išvadų, kad aerodinaminis pasipriešinimas padidėja labiausiai (vidutiniškai 2,2 karto), padidėjus dujų srauto greičiui ciklono kanaluose nuo 12 m/s iki 16 m/s. Esant dujų srauto greičiui mažesniam nei 12 m/s, aerodinaminio pasipriešinimo pokytis pakinta nereikšmingai.

Sukūrus naujos konstrukcijos daugiakanalį cikloną, buvo atlikti aerodinaminio pasipriešinimo tyrimai, kurių rezultatai pateikti 3.14 paveiksle.

Kartu su aerodinaminio pasipriešinimo buvo nustatyti kiti slėgio parametrai prieš ir už ciklono. Esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, dinaminis slėgis prieš ir po ciklono buvo lygus 368,5 Pa ir 366,7 Pa. Lyginant su atveju tiriant daugiakanalį cikloną, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, vertės padidėjo apytiksliai 2,3 karto. Tokiam padidėjimui turėjo įtakos patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcijoje įrengti antriniai dujų įtekėjimai, kurie paskirsto visą dujų srauto debitą pro vienodus keturis įtekėjimus. Tam, kad būtų pasiektas analogiškas vidutinis dujų greitis kanaluose, reikalingas didesnis bendras dujų srautas. Statinis slėgis prieš cikloną buvo 1110 Pa, po ciklono sumažėjo apytiksliai 1,4 karto ir tapo lygus 805 Pa. Aerodinaminis pasipriešinimas buvo gautas 1,21 karto mažesnis nei atveju tiriant daugiakanalį cikloną, kuriame buvo įrengtas vienas įtekėjimas, ir jis buvo lygus 305 Pa.

Esant agresyviųjų dujų srauto atvejui, statinis slėgis prieš ir po ciklono buvo atitinkamai lygūs 1153 Pa ir 818 Pa. Šiuo atveju, lyginant su neagresyviųjų dujų srauto atveju, dinaminis įtekėjimo slėgis sumažėjo 1,34, o ištekėjimo iš ciklono – 1,15 karto.

Kai neagresyviųjų dujų srauto greitis kanaluose buvo mažesnis, statinis slėgis prieš cikloną buvo 636 Pa ir 493 Pa, o po ciklono – 441 Pa ir 403 Pa, atitinkamai esant 12 m/s ir 8 m/s greičiams. Esant atvejui, kai dujų srauto greitis ciklono kanaluose buvo mažiausias iš visų nagrinėtų ir lygus 8 m/s, patobulinto daugiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas skyrėsi tik 5 Pa, t. y. prietaiso matavimo paklaida, lyginant su daugiakanalio su vieno įtekėjimu ciklono atveju nustatyta verte, buvo 90 Pa.



3.14 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono aerodinaminio pasipriešinimo pokytis esant skirtingam vidutiniam dujų srauto greičiui kanaluose esant neagresyviųjų bei agresyviųjų dujų srautams (šaltinis: autorius)

Fig. 3.14. The changes of aerodynamic resistance in the newly designed multi-channel cyclone under different average flow velocities in the channels under laboratory conditions and at aggressive gas flow (source: author)

Esant 12 m/s ir mažesniai dujų srauto greičiams aerodinaminis pasipriešinimas patobulinto daugiakanalio ciklono nustatytas 18,2 % didesnis nei daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas. Esant agresyviųjų dujų srautui, skirtumas tarp vieno įtekėjimo ir patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcijų aerodinaminį pasipriešinimą sumažėjo dar labiau. Esant 16 m/s, 12 m/s ir 8 m/s agresyviųjų dujų srauto greičiui, aerodinaminiai pasipriešinimai atitinkamai lygūs 335 Pa, 225 Pa ir 110 Pa. Esant minėtiems atvejams statinių slėgių prieš ir po ciklono bei dinaminių slėgių kitimo tendencija išliko panaši, o vertės buvo 538 Pa ir atitinkamai 428 Pa. Esant 12 m/s vidutiniam neagresyviųjų dujų srauto greičiui patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose dinaminis slėgis įtekėjime buvo lygus 190,6 Pa, o ištekėjime – 186,4 Pa. Analizuojant agresyviųjų dujų srautą, pastarasis parametras įtekėjime sumažėjo 1,35, o ištekėjime – 1,18 karto. Aerodinaminio pasipriešinimo didėjančią tendenciją esant agresyviųjų dujų srautui pagrindžia ir statinių slėgių skirtumas įtekėjime ir ištekėjime iš patobulinto daugiakanalio ciklono, kurie buvo lygūs 735 Pa ir atitinkamai 510 Pa. Dinaminiai slėgiai esant 8 m/s neagresyviųjų dujų srauto greičiui įtekėjime ir ištekėjime buvo lygūs 95,5 Pa ir 94,1 Pa, o esant agresyviųjų dujų srautui – sumažėjo atitinkamai 26,9 % ir 16,3 %. Statistiškai įvertinus gautus rezultatus nustatytas koreliacijos koeficientas tarp aerodinaminio pasipriešinimo esant neagresyviųjų ir agresyviųjų dujų srautams, kuris lygus 0,9996. Įvertinant galimą tyrimų

įrangos paklaidą, gautų verčių nuokrypis gali būti lygus ± 5 Pa, t. y. esant mažiausiai iš verčių (90 Pa) sudaryti 5,6 % paklaidą, o esant didžiausiai (335 Pa) – 1,5 %.

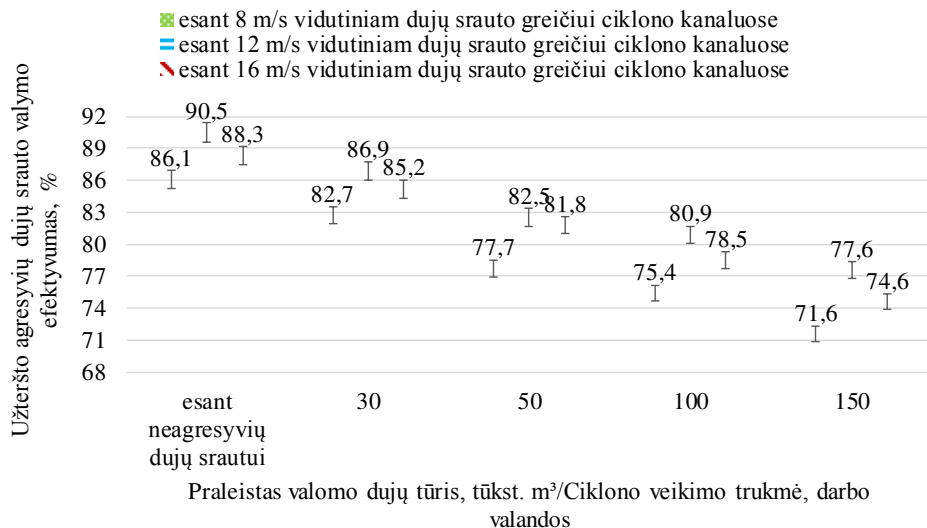
Ištirta, kad daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, aerodinaminis pasipriešinimas padidėja 17,5 % esant agresyviųjų dujų srauto sąlygoms, o patobulinto daugiakanalio ciklono – padidėja 14,1 %. Patobulinto daugiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas labiausiai pakito lyginant neagresyviųjų ir agresyviųjų dujų srauto atvejus, kai dujų srauto greitis buvo mažesnis, t. y. 8–12 m/s, o daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas – esant 12–16 m/s dujų srauto greičiui.

Buvo atlikti tyrimai, panaudojant tokią patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukciją, kai separavimo kameros dugne nebuvo įrengti vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai, o tik išorinis ištinis žiedinis plyšys. Esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, dinaminis slėgis prieš ir po ciklono buvo lygus 361,6 Pa ir 355,7 Pa. Lyginant su atveju, kai patobulintame daugiakanaliame ciklone buvo įrengti išorinis ir vidiniai plyšiai, vertės sumažėjo 2–3 %. Statinis slėgis prieš cikloną buvo 1210 Pa, po ciklono buvo lygus 725 Pa. Aerodinaminis pasipriešinimas buvo 59 % didesnis nei patobulinto daugiakanalio ciklono atveju ir buvo lygus 485 Pa. Esant 12 ir 8 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, dinaminis slėgis buvo lygus 183,0 Pa ir atitinkamai 88,9 Pa prieš cikloną bei 178,8 Pa ir 86,0 Pa – po ciklono. Statinis slėgis, esant 12 m/s greičiui, buvo lygus 740 Pa ir 415 Pa bei esant 8 m/s – 545 Pa ir 370 Pa, prieš ir atitinkamai po ciklono. Aerodinaminis pasipriešinimas esant pastariesiems atvejams buvo lygus 325 Pa ir 175 Pa (3.14 pav.).

3.6. Patobulinto daugiakanalio ciklono bendro kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Daugiakanalio ciklono taikymas – SDKD iš agresyviųjų dujų srauto šalinti. Buvo nustatytas daugiakanalio ciklono, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, efektyvumas atskirais darbo laikotarpiais. Pradinis atskaitos taškas – nulinis ciklono darbo laikas esant neagresyviųjų dujų srautui. Praleistas 30 000 m³ valomo agresyviųjų dujų–garų–rūko srauto kiekis atitinka 30 darbo valandų laikotarpį, 50 000 m³ agresyviųjų dujų tūriui – 50 darbo val. ir t. t. Kaip matyti 3.15 paveiksle, didžiausias lignino SDKD šalinimo efektyvumas buvo pasiektas esant 12 m/s neagresyviųjų dujų srauto vidutiniam greičiui ciklono kanaluose, ir lygus 90,5 %, tiriant medienos pelenų SDKD – 86,9 %, o medienos SDKD – 89,6 %. Tuo atveju, kai greitis buvo sumažintas iki 8 m/s, efektyvumas sumažėjo

vidutiniškai 4,4 %. Taip pat buvo pastebėta, kad dalis SDKD nežymiai kaupiasi ant ciklono separavimo kameros dugno. Išsami analizė buvo publikuota autoriaus mokslo straipsnyje (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2018).



3.15 pav. Smulkiadispersių lignino kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo iš agresyviųjų dujų srauto priklausomybės nuo praleisto agresyviųjų dujų srauto arba ciklono veikimo trukmės, esant skirtingam vidutiniam dujų srauto greičiui daugiakanalio ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Fig. 3.15. The dependence of the removal efficiency of lignin fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow on the pass of the cleaned gas flow or cyclone operation time at different average flow velocity in the multi-channel cyclone's channels (source: author)

Galima teigti, kad sumažėjusios dėl mažesnio dujų srauto greičio išcentrinės jėgos nepajėgia išnešti dalies kietųjų dalelių, o vykstanti naujai atitekančio srauto filtravimas tarpuose tarp ketvirtadalio žiedo formos elementų vyksta ne taip efektyviai. Esant didesniems greičiams, t. y. 16 m/s, tiek lignino, tiek ir medienos SDKD šalinimo efektyvumas pradėjo tolygiai mažėti. Dujų srauto Reinoldso skaičius esant 16 m/s siekia daugiau nei $1,1 \cdot 10^5$, todėl SDKD, esant tokiems greičiams, yra greičiau iš kanalų pro išmetimo ortakį išnešamos negu nusodinamos bunkeryje.

Analizuojant atvejį, kai praleidžiama 30 000 m³ dulkėtų agresyviųjų dujų, galima pastebėti, kad valymo efektyvumai proporcingai mažėja, šis mažėjimas yra tuo staigesnis, kuo yra mažesnis greitis. Didžiausias efektyvumas pasiektas esant 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui kanaluose, valant užterštą dujų srautą

nuo lignino kietųjų dalelių, vertės siekė 86,9 % (3.15 pav.), nuo medienos – 85,6 %, o nuo medienos pelenų – 83 %.

Kaip jau buvo minėta, tyrimuose buvo pasiektas daugiau nei 95 % santykinis drėgnis ir iki 75 °C temperatūra. Termodinamikos dėsniais įrodyta, kad kuo dujų srautas yra aukštesnės temperatūros, tuo labiau jis gali būti įsotintas drėgme. Todėl, esant pastarajam agresyviųjų dujų srautui ir 8–12 m/s dujų srauto greičiui, būtų pastebėtas didesnis adhezijos reiškinys ir sistemos užkimšimas.

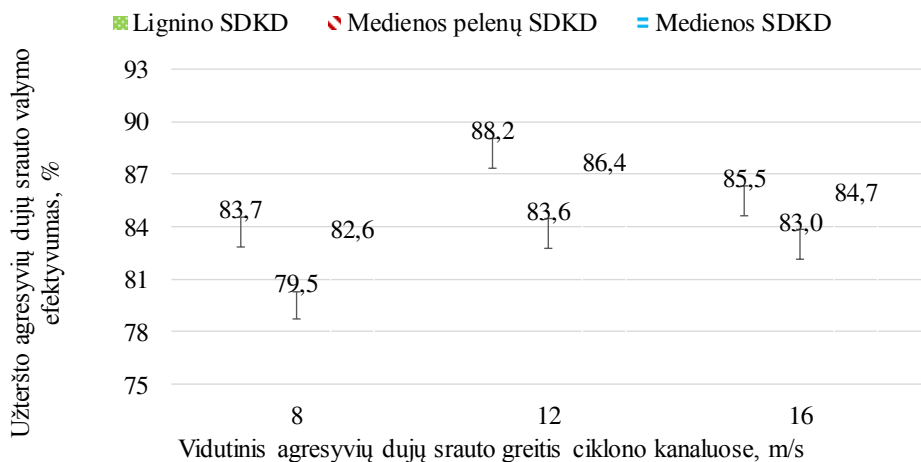
Gautų tyrimų rezultatų patikimumas nustatytas įvertinus statistinius parametrus. Valymo efektyvumo gautos vertės nustatytos iš ne mažiau nei trijų matavimų sekos. Dispersijos koeficientas atskirais atvejais kito nuo 0,5 iki 10. Standartinis nuokrypis kito 0,7–3 intervale, o variacijos koeficientas neviršijo 3,5 %. Didžiausia osciliacijos koeficiento vertė siekė 0,1. Statistiškai apdorojus tyrimų rezultatus nustatyta, kad ryšio tarp valymo efektyvumo ir praleisto valomo dujų tūrio koreliacijos koeficientas buvo didžiausias, esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui, ir buvo lygus 0,99. Kitais atvejais koreliacijos koeficientai skyrėsi nežymiai ir kito 0,96–0,97 intervale. Įvertinant valymo efektyvumo, esant skirtingam dujų srauto greičiui, atvejus, buvo nustatyta, kad stipriausias ryšys yra tarp verčių kitimo, esant 8 m/s ir 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui, kai koreliacijos koeficiento vertė buvo lygi 0,998. Silpniausias ryšys yra nustatytas tarp atvejų, esant 12 m/s ir 16 m/s dujų srauto greičiui, kai koreliacijos koeficientas (r) buvo lygus 0,988.

Didžioji dalis kietųjų dalelių užkemša plyšius, esančius ketvirtadalio žiedo formos elementuose, taip pat plyšius, esančius separavimo kameros dugne, pro kuriuos SDKD patenka į bunkerį. Dėl šios priežasties kuo aukštesnės temperatūros ir kuo didesnio drėgnio agresyviųjų dujų srautas, tuo labiau rekomenduotina taikyti didesnį dujų srauto greitį kanaluose. Svarbu paminėti, kad didžiausias greitis gali būti apribotas tuo, kad SDKD negalėtų būti pasiurbtos iš bunkerio ir galėtų būti grąžintos atgal į cikloną ar būti išneštos į aplinką.

Analizuojant valymo efektyvumo kitimą atskirais ciklono veikimo laikotarpiais galima matyti, kad, praėjus vidutiniškai apie 50 darbo valandų (50 000 m³ agresyviųjų dujų tūriui), valymo efektyvumas sumažėja vidutiniškai 8–9 %. Prieinama prie išvados, kad nuolatinis agresyviųjų dujų srauto valymas sukelia didesnį SDKD kaupimąsi daugiakanaliame ciklone. Pasireiškianti SDKD adhezija sukelia naujų SDKD sancaupų, trukdančių efektyviam srauto valymui.

Ištirtuose paskutiniuose pagal ciklono veikimą pasirinktuose etapuose, valymo efektyvumas visais atvejais išsilaiko virš 70 %. Taip pat galima matyti, kad vidutinių verčių tiesės, atitinkančios 12 m/s ir 16 m/s greičių atvejus, yra panašių tendencijų, o 8 m/s atveju – agresyviųjų dujų srauto valymui turi didesnės įtakos. Todėl dujų srauto greičio padidinimas, esant tokioms ypatingoms sąlygoms, yra galimas ne tik valymo efektyvumui išlaikyti, tačiau ir siekiant išvengti ciklono užsikimšimo bei tolesnio darbo sustabdymo.

Lignino, medienos pelenų ir medienos SDKD šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatai, taikant patobulintą daugiakanalį cikloną pateikti 3.16 paveiksle. Pasiskirstymuose buvo išanalizuotas valymo efektyvumo, priklausomai nuo agresyviųjų dujų srauto greičio ciklono kanaluose, kitimas, kuris buvo lygus 8 m/s, 12 m/s ir 16 m/s. Didelių SDKD sankaupų patobulintame daugiakanaliame ciklone su antriniais dujų įtekėjimais, valant agresyviųjų dujų srautą nepastebėta. Todėl valymo efektyvumo tyrimai buvo atlikti tik paskutiniajame analizuojamame ciklono darbo laiko tarpe, t. y. praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, apytiksliai po 116 darbo valandų.



3.16 pav. Smulkiadispersių lignino, medienos pelenų ir medienos kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo iš agresyviųjų dujų srauto priklausomybės nuo vidutinio dujų srauto greičio patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Fig. 3.16. The dependence of the removal efficiency of lignin, wood ash and wood fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow on the pass of the cleaned gas flow or cyclone operation time at different average flow velocity in the newly designed multi-channel cyclone's channels (source: author)

Kaip galima matyti, lignino SDKD šalinimo efektyvumas buvo visais atvejais didžiausias, taigi efektyvumas maksimumą pasiekia, esant 12 m/s vidutiniam greičiui ciklono kanaluose, ir yra lygus 88,2 %. Medienos pelenų ir medienos SDKD šalinimo efektyvumas yra atitinkamai 4,6 % ir 1,8 % mažesnis. Esant mažesniai agresyviųjų dujų srauto greičiui – 8 m/s, visų tipų SDKD šalinimo efektyvumas buvo mažesnis apytiksliai 4,1 %, lyginant su ankstesniu atveju. Didžiausias dulkėto agresyviųjų dujų srauto valymo efektyvumo sumažėjimas nustatytas panaudojant lignino SDKD. Vidutinis valymo efektyvumas esant 12 m/s agresyviųjų dujų srautui yra lygus 86,1 %.

Esant didžiausiam 16 m/s agresyviųjų dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, buvo nustatytas valymo efektyvumo sumažėjimas 0,6–2,7 %, lyginant su atveju, esant 12 m/s dujų srauto greičiui. Reikia pabrėžti, kad visais ištirtais atvejais agresyviųjų dujų srautas buvo užterštas kietosiomis dalelėmis, kurių didžiąją dalį sudarė mažesnės nei 10 μm SDKD, o kietųjų dalelių, kurių dydis siekė 2,5–10 μm , sraute apytikriai buvo 30 %. Tuo tarpu šalinimo efektyvumas, išskyrus medienos pelenų atvejį, ciklono kanaluose esant mažam dujų srauto greičiui (8 m/s), buvo didesnis nei 83 %, įvertinus sąlyga, kad, praleidus 150 000 m^3 dulkėtų agresyviųjų dujų, patobulintame ciklone nebuvo nustatytų reikšmingų valymo įrenginio darbui adhezijos reiškinių.

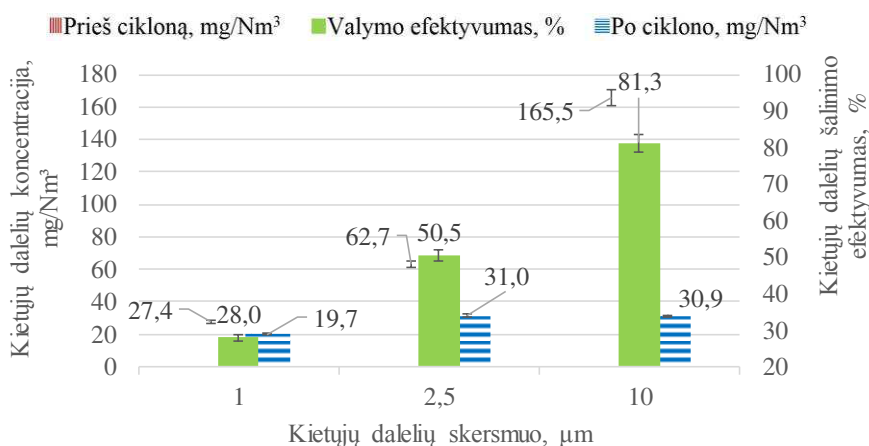
Atlikus statistinę tyrimų rezultatų analizę, nustatyti stipriausi sąryšiai tarp sudarytų priklausomybių. Įvertinant valymo efektyvumo, esant skirtingam dujų srauto greičiui atvejus, buvo nustatyta, kad stipriausias ryšys yra tarp verčių kitimo panaudojant medienos pelenų SDKD, kai koreliacijos koeficiento vertė buvo lygi 0,79. Išanalizuotos valymo efektyvumo kitimo tendencijos, lyginant tarpusavyje atvejus, panaudojus skirtingas SDKD. Gauta analizė parodė, kad stipriausia ryšį turi verčių kitimas, panaudojant lignino ir medienos SDKD, kai koreliacijos koeficientas buvo lygus 0,985. Tuo tarpu panaudojant medienos pelenų SDKD, koreliacijos koeficientas buvo lygus 0,876 ir atitinkamai 0,947, lyginant su atvejais, panaudojant lignino ir medienos SDKD. Todėl prieinama prie išvados, kad lignino ir medienos SDKD yra ne tik panašios pagal struktūrą ir fizinius parametrus, tačiau ir jų šalinimas patobulintame daugiakanaliame ciklone vyksta panašia tendencija. Medienos pelenų SDKD šalinimo efektyvumo kitimas yra labiau artimas medienos SDKD.

Valymo efektyvumo gautos vertės nustatytos iš ne mažiau nei trijų matavimų sekos. Dispersijos koeficientas kito nuo 1,2 iki 8. Standartinis nuokrypis kito 1–2,8 intervale, o variacijos koeficientas neviršijo 3,5 %. Didžiausia osciliacijos koeficiento vertė siekė 0,08.

Būtina paminėti, kad lyginant patobulintą daugiakanalį cikloną su antriniais dujų įtekėjimais ir daugiakanalį cikloną, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas, didžiausi pasiekti valymo efektyvumai viso tyrimo metu gauti tiriant daugiakanalio ciklono pirminį variantą. Tačiau praleidus 150 000 m^3 agresyviųjų dujų, patobulinto daugiakanalio ciklono užsikimšimas nėra reikšmingas, todėl įrenginys gali būti eksploatuojamas ir toliau. Tuo atveju pirminiame daugiakanalio ciklono konstrukcijos variante, praleidus šio tūrio agresyviasias dujas, ženkliai pasireiškė kietųjų dalelių kaupimasis visuose ciklono kanaluose. Dalis vidinių elementų, tokių kaip segmentiniai plyšiai bei tarpai tarp ketvirtadalio žiedo formos elementų ir juose esančių atlenktų plokštelių visiškai užsikimšo, todėl įrenginys negalėjo būti efektyviai eksploatuojamas.

3.7. Patobulinto daugiakanalio ciklono 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatai ir jų analizė

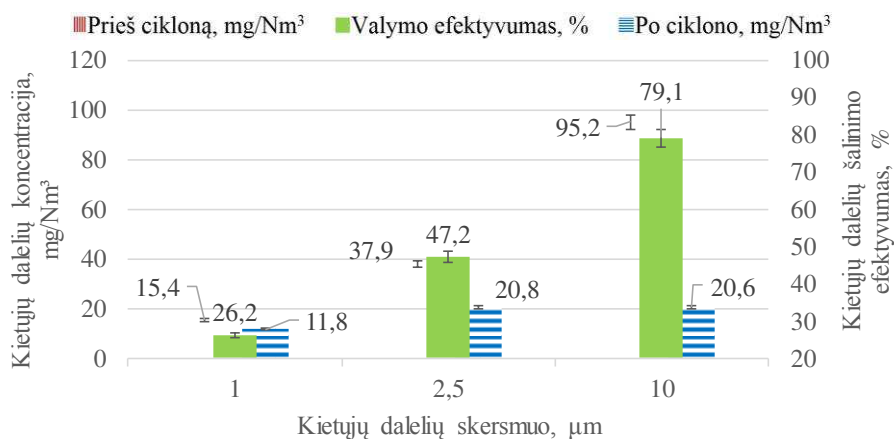
Patobulintas daugiakanalis ciklonas geba pašalinti smulkiadisverses kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų srauto. Valymo įrenginio testavimui buvo atlikti skirtingo skersmens SDKD šalinimo efektyvumo tyrimai, panaudojant kaskadinio impaktoriaus sistemą. Buvo ištirti 1 μm , 2,5 μm ir 10 μm skersmens lignino, medienos ir medienos pelenų kietųjų dalelių šalinimo efektyvumai (3.17–3.18 pav.).



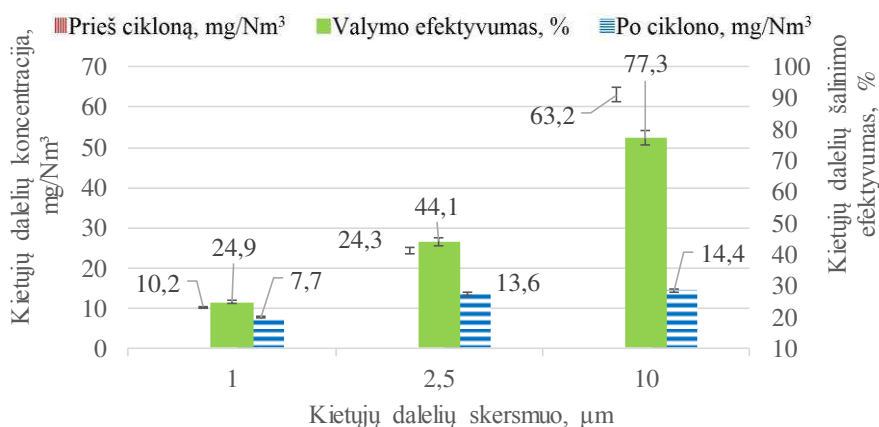
3.17 pav. Skirtingo skersmens smulkiadisversių lignino kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas iš agresyviųjų dujų srauto ir jų pasiskirstymas prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono, esant $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ bendrai kietųjų dalelių koncentracijai ir 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Fig. 3.17. The removal efficiency of different sizes of lignin fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow and their distribution in the newly designed multi-channel cyclone's inlet and outlet, at $300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ total concentration and at the average velocity of 12 m/s in the cyclone's channels (source: author)

Ištirtos SDKD šalinimo efektyvumo priklausomybės, atsižvelgiant į SDKD koncentracijas agresyviųjų dujų sraute, kurios buvo parinktos lygios $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, $500 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ir $300 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ($\pm 10 \%$).



a)



b)

3.18 pav. Skirtingo skersmens smulkiadispersių lignino kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas iš agresyviųjų dujų srauto ir jų pasiskirstymas prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono, esant 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose ir bendrai kietųjų dalelių koncentracijai: a) 500 mg/Nm^3 ir b) 300 mg/Nm^3 (šaltinis: autorius)

Fig. 3.18. The removal efficiency of different sizes of lignin fine-dispersed particulate matter from aggressive gas flow and their distribution in the newly designed multi-channel cyclone's inlet and outlet, at the average velocity of 12 m/s in the cyclone's channels and at total concentration of particulate matter: a) 500 mg/Nm^3 and b) 300 mg/Nm^3 (source: author)

Medienos ir medienos pelenų SDKD detalūs tyrimų rezultatai pateikti C priede.

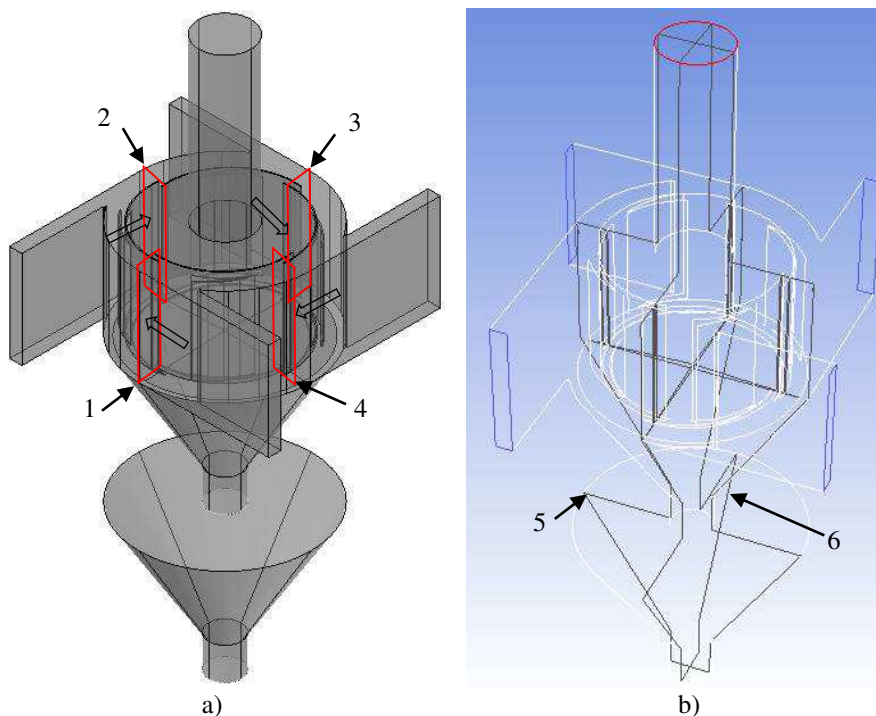
Daroma prielaida, kad, didėjant kietųjų dalelių skersmeniui, SDKD svoris yra pagrindinis veiksnys, kuris žymiai padidina SDKD šalinimą ciklone. Medienos pelenų 2,5 μm ir 10 μm skersmens SDKD koncentracijos po ciklono buvo didesnės nei lignino, o lyginant su medienos – mažesnės. Remiantis tuo, galima teigti, kad atskirais atvejais medienos ir medienos pelenų SDKD užterštas agresyviųjų dujų srautas būtų išvalomas iki panašių koncentracijų nuo 2,5–10 μm kietųjų dalelių. Tačiau dėl to, kad ypač smulkių medienos kietųjų dalelių, kurių dydis siekia 1 μm , yra žymiai mažiau nei medienos pelenų bendrame sraute dėl jų savitos prigimties, todėl jų koncentracija po ciklono yra apytikriai 3 kartus mažesnė.

Remiantis tyrimų rezultatais, galima teigti, kad esant mažiausiai iš nagrinėtų 300 mg/Nm³ koncentracijai, medienos pelenų SDKD šalinimo efektyvumo vertės yra apytiksliai lygios su atvejais panaudojant lignino ir medienos SDKD, o nuo 1 μm skersmens kietųjų dalelių – net didesnė ir lygi 25,6 %.

3.8. Kietųjų dalelių ir dujų judėjimo procesų skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatai ir jų analizė

Skaitinio modeliavimo tyrime buvo siekiama sukurti patobulinto daugiakanalio ciklono modelį bei jam pritaikyti programinio paketo patobulintą klampos modelį. Autoriaus atliktais tyrimais buvo nustatyti optimalūs skaičiavimo tinklelio bei optimalaus klampos modelio parametrai, atlikta dujų judėjimo procesų analizė daugiakanaliame ciklone, kuriame įrengtas vienas įtekėjimas. Remiantis tyrimų rezultatais, skaitinis modeliavimas buvo pratęstas, taikant patobulinto daugiakanalio ciklono geometriją. Optimalių klampos modelių nustatymai bei jų derinimas nagrinėjamam daugiakanaliam ciklonui buvo grindžiamas mažiausių gautų paklaidų metodu skaičiuojamiems klampos modelio kintamiesiems. Didžiausio eksperimentinių tyrimų rezultatų atitikties bei mažiausių gautų modelio kintamųjų paklaidų turintis atvejis buvo pasirinktas kaip optimalus dujų srauto judėjimo procesams daugiakanalio ciklono modelyje tirti.

Taikant kaip optimalų pasirinktą vidutinio detalumo tinkelį, optimaliam klampos modelio parinkimui buvo analizuotas dujų srauto greičio pasiskirstymas daugiakanalio ciklono kanaluose (3.19 pav.). Skaitinio modeliavimo dujų srauto greičių pasiskirstymo tyrime buvo analizuojamas verčių kitimas kiekvieno kanalo pradžioje. Buvo nagrinėjamas skerspjūvio plotas, esantis 2 cm atstumu nuo kreivalinijinio elemento briaunos pradžios. Analizė atlikta pagal 15 tyrimo taškų – bendras kanalo aukštis padalytas į 5 atkarpas, o plotis – į 3, vertės fiksuotos skiriančių zonas linijų susikirtimuose (3.20 pav. a), 1 taškas).



3.19 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono trimatis modelis: a) bendras vaizdas; b) schema; 1, 2, 3, 4 – skerspjūvis atitinkamai pirmo, antro, trečio ir ketvirto patobulinto ciklono kanalo pradžioje; 5 – pjūvio plokštuma per 1-ojo ir 3-ojo kanalų pradžią; 6 – pjūvio plokštuma per 2-ojo ir 4-ojo kanalų pradžią (šaltinis: autorius)

Fig. 3.19. A newly designed multi-channel cyclone 3D model: a) a main view; b) schema; 1, 2, 3, 4 – cross-section at the beginning of the 1st, 2nd, 3rd and 4th newly designed cyclone's channels respectively; 5 – section plane at the beginning of channels 1 and 3; 6 – section plane at the beginning of channels 2 and 4 (source: author)

ANSYS 16.1 Fluent paprogramyje buvo sudarytas grafinis rezultatų vaizdas. Pasienio sluoksnis ties ketvirtadalio žiedo formos elemento išoriniu paviršiumi nustatytas pirmajame kanale (3.20 pav. a), 3 taškas), kur visiškai sustabdomas dujų srautas. Ties vidiniu ketvirtadalio žiedo formos elemento paviršiumi, iškart už pasienio sluoksnio, susidaro dujų srauto greičio maksimumai, šios zonos plotas yra didžiausias pirmajame kanale (3.20 pav. a), 4 taškas), kur vertės kito 15,4–19,5 m/s intervale. Trečiajame kanale ši zona (3.20 pav. c), 4 taškas) nutrūksta artėjant prie separavimo kameros dugno, o greičio vertės kinta 11,6–14,5 m/s intervale. Ketvirtame kanale greičio maksimumų zona nustatyta tik tarp pirmojo ir ketvirtojo kreivalinijinių elementų, kur vertės kito 12,4–15,7 m/s

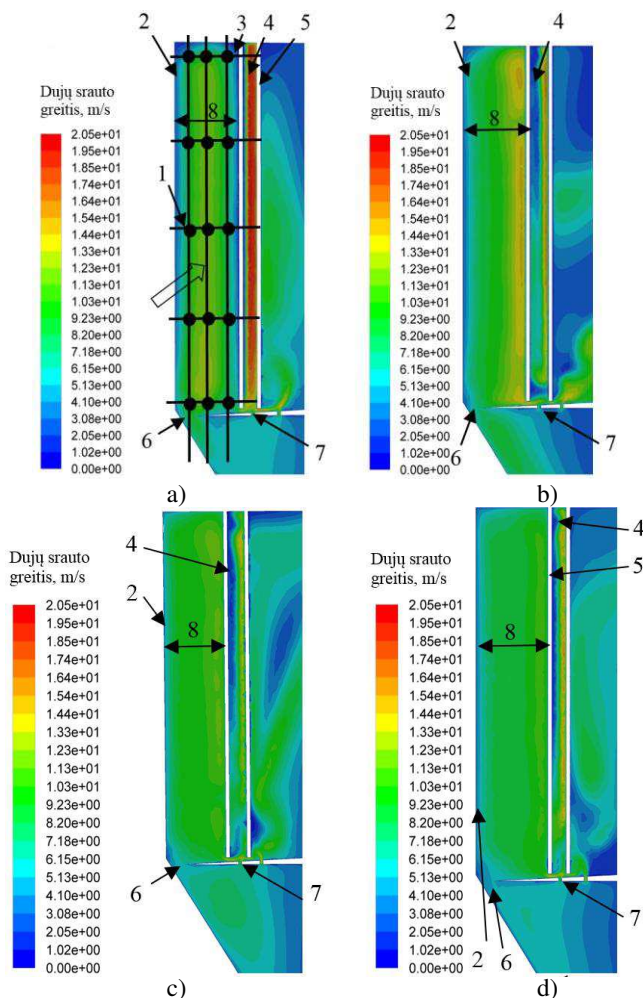
intervale. Antrame kanale šios zonos plotas yra mažiausias (mažiau nei 20 % viso ploto tarp kreivalinių elementų), o greičiai kito 13,1–16,6 m/s.

Gauti dujų srauto greičio pasiskirstymo rezultatai spalvų paletėje suteikė galimybę detaliai išanalizuoti dujų judėjimo procesus patobulintame daugiakanaliame ciklone. Separavimo kameros dalyje tarp periferinės sienelės ir kreivalininio elemento pavaizduotas dujų srauto judėjimas atitinkamame išoriniame kanale (3.20 pav.).

Kiekviename kanale nustatyta keletas tik jam būdingų dujų srauto trajektorijų bei savito greičio pasiskirstymo. Pirmajame kanale (3.20 pav. a)) greičiai pasiskirstę tolygiai, kanalo viduryje vyrauja didžiausi greičiai, kurių vertės siekia iki 14,4 m/s. Išilgai viso pasienio sluoksnio prie kreivalininio elemento, prie separavimo kameros dangčio ir periferinės sienelės, dujų srautas yra ne didesnis nei 1 m/s. Išimtimi gali būti laikoma sritis prie separavimo kameros išgaubto dugno. Šioje zonoje dujų srautas juda link išorinio ištisinio žiedinio plyšio. Palei dugną dujų srautas juda 3,1–5,1 m/s greičiu, tačiau artėjant prie kreivalininio elemento pasienio sluoksnio aukštis didėja, o šioje zonoje greitis sumažėja iki 1,0–2,1 m/s. Priešinga kryptimi judantis srautas greitėja, o virš žiedinio plyšio vertės siekia 6,2–9,2 m/s (3.20 pav. a), 6 taškas).

Galima matyti, kad dujų srauto trajektorija yra nukreipta į ciklono kūginį bunkerį, o įtekant į bunkerio viršutinę dalį dujų srauto greitis sumažėja iki 2 kartų ir yra lygus 3,1–5,1 m/s. Tai įvyksta dėl to, kad dujų srautas pratekantis per siaurą žiedinį plyšį staigiai įteka į didelio tūrio bunkerio erdvę, kur dujų srauto kinetinė energija greitai yra nuslopinama. Toks dujų srauto judėjimas yra palankus kietųjų dalelių nusodinimui. SDKD yra pagaunamos didelio greičio srauto, nešamos per plyšius, o patekdamos į bunkerį dėl nedidelio vyraujančio greičio nėra pasiurbiamos atgal į separavimo kamerą. Dalis dujų srauto patenka į bunkerį per vidinius kanalų segmentinius žiedinius persidengiančius plyšius (3.20 pav. a), 7 taškas). Šių plyšių plotis yra lygus 0,005 m, ir yra mažesnis 6 kartus nei žiedinio plyšio, tačiau jie įrengti vidiniame centriniame kanale, todėl per juos prateka tik dalis judančio srauto, o dujų srautas jų skerpjūvyje pagreitėja iki 9,2–11,3 m/s. Kaip ir ištekant iš žiedinio plyšio, dujų srauto greitis staigiai sumažėja iki vyraujančio ciklono bunkeryje, t. y. vidutiniškai 4,5 m/s. Atlikus gautų teorinių (skaitinio modeliavimo) ir eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę, buvo sudarytas dujų srauto greičių pasiskirstymas visuose ciklono kanaluose. Dažniausiai didžiausios paklaidos modeliavimo tyrimuose yra nustatomos paskutiniuose nagrinėjamuose taškuose (Baltrėnas and Leonavičienė 2017). Tam tikslui buvo analizuoti dujų srauto greičiai kiekvieno kanalo pabaigoje, taikant analogišką greičio nustatymo kanalo pradžioje metodiką.

Remiantis daugiakanalio ciklono atliktų skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatais, buvo prieita prie išvados, kad, taikant k - ε patikslintos sienų geometrijos (angl. *Enhanced Wall Treatment*) klampos modelį.



3.20 pav. Dujų srauto greičių pasiskirstymas patobulinto daugiakanalio ciklono skaitiniame modelyje, ciklono kanaluose: a) pirmame; b) antrame; c) trečiame; d) ketvirtame; 1 – dujų srauto greičio nustatymo taškas sudarytame tinklelyje; 2, 3, 4 – pasienio sluoksnis ties periferine sienele, ketvirtadalio žiedo formos elemento išoriniu ir vidiniu paviršiais; 5 – gretimas ketvirtadalio žiedo formos elementas; 6, 7 – išorinis ištininis žiedinis plyšys ir vidinis kanalo segmentinis žiedinis persidengiantis plyšys; 8 – atitinkamas išorinis kanalas (šaltinis: autorius)

Fig. 3.20. Distribution of gas flow velocities in the numerical model of the newly designed cyclone in the channels: a) 1st; b) 2nd; c) 3rd; d) 4th; 1 – gas flow velocity point in the grid; 2, 3, 4 – border layer at the peripheral wall, at the outer and inner surfaces of a quarter-ring-formed element; 5 – adjacent quarter-ring-formed element; 6, 7 – external continuous ring gap and segmental ringed overlayed slits of the channel; 8 – appropriate external channel (source: author)

Mažiausi skaičiavimo nesąryšiai (angl. *residuals*) buvo gauti tik mažiausio detalumo tinklelio atveju. Tuo tarpu, panaudojant vidutinio ir didžiausio detalumo tinklelius, optimalus yra $k-\omega$ SST. Taikant šį klampos modelį kartu su vidutinio detalumo skaičiavimo tinkleliu, gautos paklaidos, lyginant su eksperimentiniais rezultatais, buvo mažiausios, todėl šis atvejis pasirinktas kaip optimalus ir analizuojamas tolesnėje šio darbo analizėje. Patobulintame daugiakanaliame ciklone SFD procesams modeliuoti yra nustatytas optimalus $k-\omega$ SST klampos modelis. Taikant pirmos ir antros eilės diskretizacijos lygtis, bei pritaikius optimalius relaksacijos koeficientus buvo gauti greičio bei t. k. e. nesąryšiai lygūs 10^{-4} , o energijos kintamojo nesąryšiai lygūs 10^{-7} .

Eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatų analizė buvo atlikta vertinant patobulinto daugiakanalio ciklono dujų srauto greičius keturiuose kanaluose.

Remiantis apskaičiuotomis paklaidų vertėmis, galima teigti, kad dujų srauto greičio vertės, gautos skirtingais tyrimais, išsiskiria mažiausiai kiekvieno iš kanalų pradžioje bei pirmojo kanalo pabaigoje.

Šiems atvejams esant, santykinės paklaidos kinta 4,3–11,8 % intervale. Tuo tarpu analizuojant dujų srauto greitį visuose kanaluose, vertės skiriasi nuo – 17,6 % iki 11,8 %.

Atlikus skaitinio modeliavimo tyrimus, taikant daugiakanalio ciklono (nepatobulinto) geometriją bei analizuojant dujų tekėjimo procesus, buvo nustatyta, kad optimalus yra vidutinio detalumo skaičiavimo tinklelis, kuriam esant buvo gautos žymiai mažesnės paklaidos nei kitais atvejais. Tuomet visų keturių kanalų pradžioje vertės skiriasi tik –2,24–8,89 %.

Atsižvelgiant į gautas paklaidas, skaitinis modeliavimas taikant patobulinto daugiakanalio ciklono geometriją buvo atliekamas taikant kaip optimalų vidutinio detalumo skaičiavimo tinklelį.

Šiam atvejui esant skaičiavimo tinklelio ląstelės tūris buvo lygus $0,136 \text{ cm}^3$. Taip pat pastebėta, kad daugiakanalio ciklono visų keturių kanalų pabaigoje modeliavimo būdu nustatytos vertės buvo gautos mažesnės nei eksperimentiniu būdu, o paklaidos kito 6,04–21,49 % intervale. Analizuojant rezultatus taikant patobulintą daugiakanalį cikloną, nustatyta, kad dujų srauto greičio vertės, gautos modeliavimo būdu, buvo didesnes už eksperimentinių tyrimų vertes tik kiekvieno iš kanalų, išskyrus pirmą, pradžioje. Paskutinio išorinio kanalo – ketvirtojo kanalo – santykinė paklaida tarp rezultatų buvo mažiausia, o vidutinė paklaida analizuojant dujų srauto greitį visuose trijuose kanaluose buvo lygi 8,6 %.

Eksperimentinių ir skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatų palyginimas pateiktas 3.4 lentelėje. Atlikus dujų srauto greičio verčių palyginimą nustatyta, kad visų keturių kanalų viduryje modeliavimo tyrimais buvo nustatytos artimos (vidutiniškai 15,4 %) santykinės paklaidos, taip pat visais atvejais buvo gautas mažesnis dujų srauto greitis nei gautas eksperimentiniais tyrimais. Panaši

tendencija pastebėta ir antrojo–ketvirtojo kanalų pabaigoje, kai vidutinė santykinė paklaida buvo 15 %. Galima daryti prielaidą, kad nustatytos paklaidos susidarė dėl galimų patobulinto daugiakanalio ciklono geometrijos modelyje neatitikimų, kurie skaitinio modeliavimo rezultatuose sudarė neatitikimo dalį tarp eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų. Kita vertus, yra vertinama ir tai, kad, vykdant eksperimentinius tyrimus, kaip ir buvo pateikta tyrimų analizėje, gautoms vertėms turėjo įtakos prietaisų neapibrėžtys, matavimo metodo bei matuotojo paklaidos.

Atlikus statistinę analizę nustatyta, kad visų verčių modulių vidutinė paklaida lygi 12 %, įvertinus teigiamas ir neigiamas paklaidas – (–7,7 %). Tarp visų verčių yra nustatytas stiprus koreliacijos ryšis, o koeficientas lygus 0,96. Įvertinus visus minėtus faktorius, galima priėti prie išvados, kad skaitinio modeliavimo būdu gautas dujų srauto greičio pasiskirstymas patobulintame daugiakanaliame ciklone yra atliktas tinkamai, taigi, nepaisant objekto geometrijos bei nagrinėjamų agresyviųjų dujų srauto dinaminių procesų sudėtingumo, gautų rezultatų patikimumas yra didelis.

3.4 lentelė. Dujų srauto greičio verčių santykinės paklaidos pagal atliktus eksperimentinius ir skaitinio modeliavimo tyrimus patobulinto daugiakanalio ciklono kanaluose (šaltinis: autorius)

Table 3.4. The relative errors of the values of the gas flow velocity in the channels of newly designed multi-channel cyclone based on experimental test and numerical simulation (source: author)

Ciklono kanalas	Dujų srauto greitis, m/s, atlikus eksperimentinius / modeliavimo tyrimus / santykinė paklaida, %		
	Kanalo pradžioje	Kanalo viduryje	Kanalo pabaigoje
I kanalas	12,4/11,8/–4,8	15,9/13,6/–14,5	17,4/16,3/–6,3
II kanalas	7,6/8,5/+11,8	12,9/11,0/–14,7	14,6/12,6/–13,7
III kanalas	7,2/7,9/+9,7	11,6/9,9/–14,7	13,4/11,4/–14,9
IV kanalas	6,9/7,2/+4,3	10,8/8,9/–17,6	12,7/10,6/–16,5

Tolesniuose tyrimuose gautos nedidelės paklaidos gali būti dar labiau sumažintos, darant papildomas prielaidas modelyje, įvedant pataisas arba papildomus kintamuosius, norint fizikinio modelio specifinius parametrus perkelti į skaitinį modelį.

Išanalizavus dujų srauto greičius ciklono kanaluose, galima teigti, kad mažiausi neatitikimai buvo gauti lyginant tyrimų rezultatus pirmajame kanale. Tyrimų rezultatais įrodyta, kad antrajame ir sekančiuose kanaluose dujų srauto

greičio verčių paklaidos didėja. Antrajame kanale skirtumas tarp eksperimentinių ir modeliavimo tyrimų rezultatų buvo lygus 2 m/s (absoliučioji paklaida), o santykinė paklaida lygi 13,7 %. Trečiajame ir ketvirtajame kanaluose santykinė paklaida buvo lygi atitinkamai 14,9 % ir 16,5 %.

Pritaikius žemo detalumo tinklėlį, jį sudarančių kiekvienos iš ląstelių tūris buvo lygus 0,156 cm³. Dujų srauto greičių kitimo tendencija išliko panaši pritaikius vidutinio detalumo tinklėlį. Visų verčių modulių vidutinė paklaida lygi 13,5 %, įvertinus teigiamas ir neigiamas paklaidas – (–10,7) %.

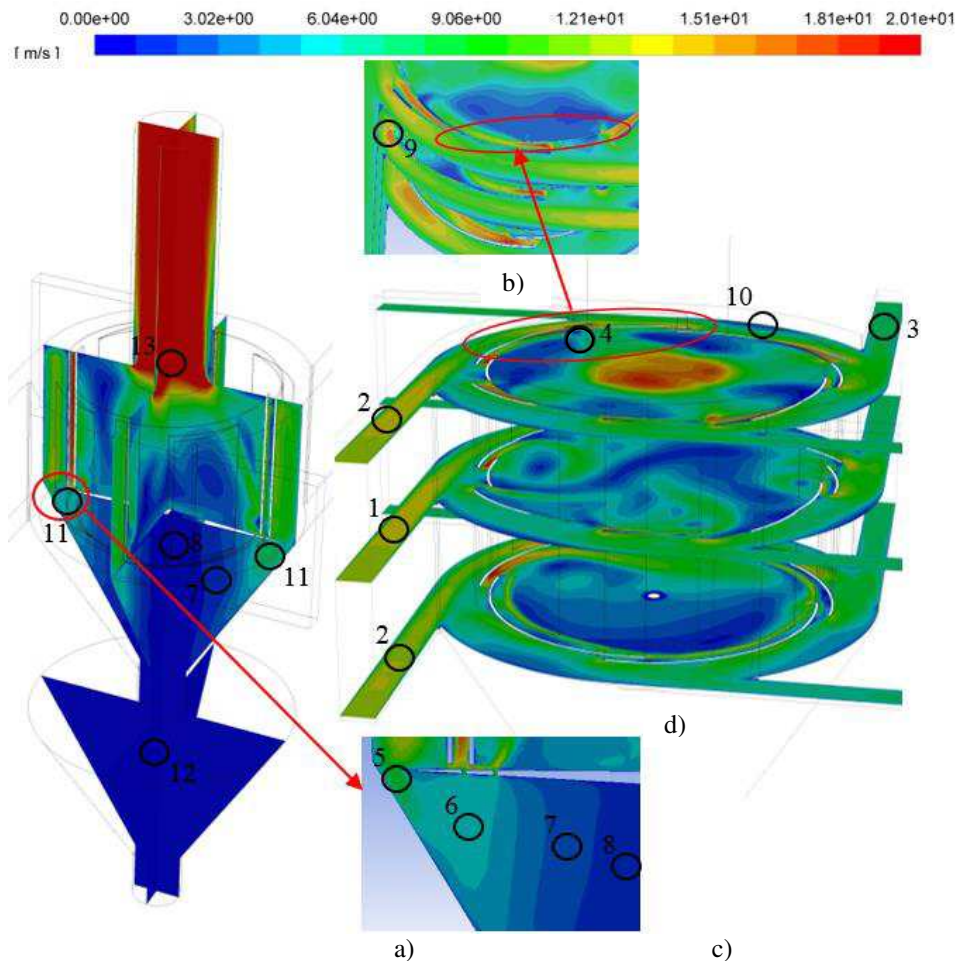
Galima prieiti prie išvados, kad sudarytas skaitinis dujų srauto judėjimo ciklone modelis yra tinkamas dujų srauto greičio pokyčiams modeliuoti, pasiekiant pakankamai aukštą tikslumą (vidutinė paklaida nesiekia 15 %). Tačiau yra nustatyta, kad dujų srauto greičio nustatymas yra sudėtingas ir ne toks tikslus trečiajame ir ketvirtajame ciklono kanaluose, kai paklaidos siekė 15 % ir daugiau. Daroma prielaida, kad tokiame tyrimų rezultatų pasiskirstymui turėjo įtakos sudėtingi besikeičiantys dinaminių parametrų kitimo procesai, kurių kitimo sparta didėjo nuo dujų srauto įtekėjimo į cikloną iki ištekėjimo iš jo.

Daugkartinių dujų srautų sujungimai bei persiskyrimai sudaro papildomų paklaidų tiesiogiai vykdant eksperimentinius tyrimus, o atliekant skaitinį modeliavimą – modelio sprendimas tampa vis sudėtingesnis, todėl daromos papildomos prielaidos, o tai sudaro ir papildomų paklaidų (3.4 lentelė).

Dujų srauto judėjimo procesų analizei buvo atliktas skaitinis modeliavimas ir sudarytas dujų srauto greičio pasiskirstymas skirtinguose daugiakanalio ciklono aukščiuose (3.21 pav.). Pateiktos 5 cm, 15 ir 25 cm aukščiuose sudarytos pjūvių plokštumos ir spektrinis dujų srauto greičio verčių pavaizdavimas ciklono separavimo kameroje bei pirminio ir antrinių dujų srauto įtekėjimuose (3.21 pav. d)).

Sudarant skaitinį modelį buvo įvesti parametrai, nusakantys kiekviename iš dujų srauto įtekėjimų įtekančio agresyviųjų dujų srauto greitį, remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais. Todėl gautas pasiskirstymas įrodo, kad didžiausiu greičiu įteka dujų srautas per pirminį įtekėjimą, kuriame 15 cm auktyje vertės siekia 13,1–14,1 m/s (3.21 pav. d), 1 taškas), tuo tarpu 5 cm ir 25 cm aukštyje nuo separavimo kameros dugno greičiai buvo lygūs 12,6 m/s (3.21 pav. d), 2 taškas). Antriniuose dujų srauto įtekėjimuose reikšmingų skirtumų nepastebėta, o vidutinis greitis, kaip, pvz., 3 taške (3.21 pav. d)) buvo lygus 8,1 m/s. Šio pasiskirstymo priežastis jau buvo plačiai aptarta eksperimentinių tyrimų analizėje.

Analizuojant dujų judėjimo procesus patobulintame daugiakanaliame ciklone pastebėta, kad dujų srauto dalis, kuri nukrypsta pro išorinį ištininį periferinį plyšį į bunkerius, didžiąja dalimi patenka į kūginio bunkerio viršutinę dalį, o tai galima matyti vertikaliame pjūvyje (3.21 pav. a)) bei jo detalizacijoje (3.21 pav. e)). Kuriant fizikinį modelį buvo stengtasi įrengti tam tikro pločio plyšį (buvo pasirinktas 3 cm pločio plyšys), norint kuo efektyviau nusodinti kietąsias daleles, judančias agresyviųjų dujų sraute.



3.21 pav. Dujų srauto greičio pasiskirstymams: a) vertikalaus dvigubo pjūvio plokštumose, b) horizontaliuose pjūviuose 5 cm, 15 cm ir 25 cm aukščiuose, c) bunkeryje ir d) patobulinto daugiakanalio ciklono separavimo kameroje ir (šaltinis: autorius)

Fig. 3.21. Gas flow velocity distribution in: a) vertical double-cut planes, b) horizontal sections 5 cm, 15 cm and 25 cm at height, c) hopper and d) newly designed multi-channel cyclone's separation chamber (source: author)

Pastebėta, kad įtekančio per plyšį dujų srauto greitis lygus 9 m/s (3.21 pav. e), 5 taškas), kuris sumažėja iki 5–6 m/s nutolus 5 cm spinduliu nuo periferinės sienelės (6 taškas), atkarpos viduryje tarp periferinės sienelės ir ciklono ašies

greitis siekia 2–3 m/s (7 taškas), o ciklono ašyje – 0–1 m/s (8 taškas). Yra nustatyta, kad dujų srauto greitis stipriai kinta bunkerio dalyje ties periferiniu plyšiu iki atkarpos, kur yra įrengti vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai. Vėliau, tolstant link ciklono ašies, atstumai tarp skirtingų verčių izolinijų didėja, o pačios sritys išsidėsto kaip vertikalios plokštumos, t. y. link ciklono ašies pasireiškia tolygus greičio mažėjimas. Toks dujų srauto slopimas padeda išvengti kietųjų dalelių grįžimo į separavimo kamerą dėl didelio greičio sukurių arba pasiurbimų eksploatuojant daugiakanalį cikloną dulkėto dujų srauto valymui. Apskaičiuotame skaitiniame modelyje tarp visų keturių išorinių ciklono kanalų didžiausias dujų srauto greitis buvo nustatytas pirmajame ir antrajame kanaluose.

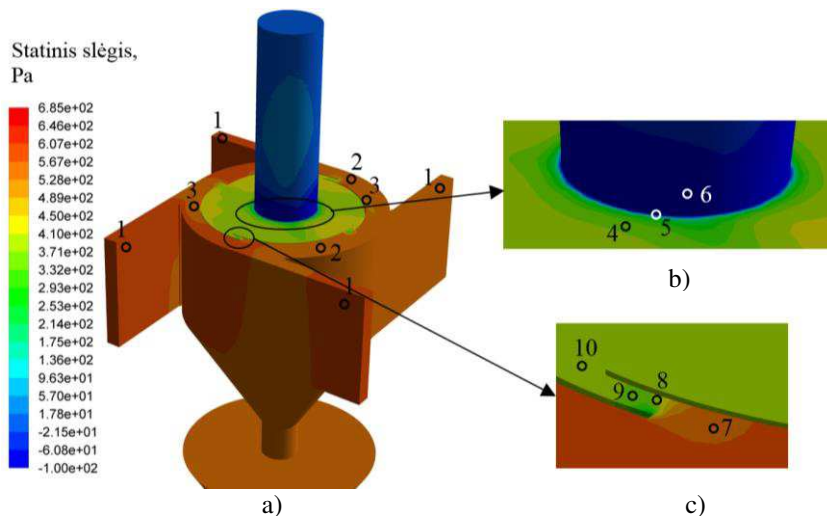
Dujų srauto greitis padidėja ypač šių kanalų pabaigoje, o vertės siekia iki 14,1–17,1 m/s (3.21 pav. b) atvejis, 4 ir 9 taškai). 3.21 paveiksle d) galima matyti, kad didžiausio greičio dujų srauto trajektorijos juda tik kanalo skerspjūvio viduryje, tuo tarpu artėjant link sienelių greitis staigiai sumažėja ir siekia ne daugiau nei 5 m/s (10 taškas). Trečiajame ciklono kanale dujų srauto greitis kinta nežymiai, o vidutinė vertė lygi 8,0–10,1 m/s intervale, o 5 cm aukštyje nuo separavimo kameros dugno sumažėja apytiksliai 20 %, t. y. vertės pasiskirsto 5,0–8,0 m/s intervale. Ketvirto kanalo viduryje apatiniam pjūvyje, esančiame 5 cm atstumu iki separavimo kameros dugno, nustatyta, kad dujų srauto greitis sumažėja labiausiai, o vertės siekia ne daugiau nei 6 m/s.

Prieinama prie išvados, kad tokio reiškinio priežastis yra dvejopa: dujų srauto kinetinės energijos praradimas, judant ciklono kanalais, ir ciklono ketvirtojo kanalo skerspjūvio padidėjimas, todėl dujų srauto greitis sumažėjo iki 10,6 m/s.

Vertikaliajam pasiskirstymui charakterizuoti buvo parinkta dviguba pjūvio plokštuma: pirmoji plokštuma kerta pirmojo kanalo pradžią, einantį per įrenginio ašį ir pabaigoje kertanti trečiojo kanalo pradžią, bei antroji – kertanti antrojo kanalo pradžią ir pabaigoje kertanti ketvirtojo kanalo pradžią (3.21 pav. a)). Remiantis gautomis izolinijomis galima teigti, kad ciklono bunkeryje dujų srauto greitis sumažėja nuo 8 m/s (3.21 pav. a), 11 taškas) iki 1,0 m/s (3.21 pav. a), 7 taškas). Mažiausio dujų srauto greičio zona patobulintame daugiakanaliame ciklone – viršutinės kūginės bunkerio dalies ašyje (3.21 pav. a), 8 taškas) bei visoje apatinėje kūginėje bunkerio dalyje (3.21 pav. a), 12 taškas), kuriose dujų srauto greitis ne didesnis nei 1,0 m/s. Mažiausio dujų srauto greičio zona bunkerio dalyje yra pasiskirsčiusi apytiksliai 0,1 m atstumu į abi puses nuo įrenginio ašinės linijos. Mažas dujų srauto greitis ciklono bunkeryje yra svarbus tuo, kad kietosios dalelės, patekusios į jį, nebus išnešamos atgal į separavimo kamerą, o tai padidins valymo efektyvumą.

Dujų srauto išėjimo anga ir ortakis orientuoti separavimo kameros viršutinėje dalyje išilgai daugiakanalio ciklono ašinės linijos. Dujų srautas šioje zonoje įgauna 19,1–20,1 m/s greitį (3.21 pav. a), 13 taškas) iškart patekęs į dujo srauto pašalinimo ortakį.

Atlikus skaitinį dujų judėjimo procesų modeliavimą buvo nustatyti statinio slėgio ir t.k.e. parametrai ties patobulinto daugiakanalio ciklono sienelėmis. Šie parametrai yra svarbūs analizuojant dujų srauto judėjimą dėl veikiančių dinaminį jėgų ir jų sąveiką su ciklono vidiniais elementais (3.22 pav.).



3.22 pav. Dujų srauto statinio slėgio pasiskirstymas: a) ties patobulinto daugiakanalio ciklono sienelėmis; b) dujų srauto pašalinimo ortakyje; c) tarpe tarp kreivinių ketvirtadalių žiedo formos elementų (Šaltinis: autorius)

Fig. 3.22. Distribution of gas flow static pressure: a) at the walls of the newly designed multi-channel cyclone; b) in gas flow removal outlet duct; c) in the spaces between curved quarter-ring-formed elements (source: author)

Dujų srauto statinio slėgio pasiskirstymas patobulintame daugiakanaliame ciklone sudarytas norint nustatyti reikšmingas didelio slėgio zonas, kuriose dujų srautas labiausiai veikia įrenginio sieneles ir tuo pačiu tolesniam judėjimui turi didžiausią potencinę energiją. Vertinant statinio slėgio pasiskirstymo spektrą (3.22 pav. a)), galima matyti, kad pirminio ir antrinių dujų įtekėjimų pradžioje vertės siekia 567–607 Pa (3.22 pav. a), 1 taškas), tačiau tik pirminiame įtekėjime ši vertė išlieka iki kanalo pradžios, toliau sumažėja iki 548 Pa, o toliausiai – yra lygi 587 Pa. Trečiojo ir ketvirtąjo dujų srauto įtekėjimų į atitinkamus kanalus vietose, statinis slėgis sumažėja iki 528–567 Pa, ir tokio slėgio zona tęsiasi tiek visame trečiajame, tiek ir ketvirtajame kanaluose (3.22 pav. a), 2 taškas). Kiekvieno kanalo viduryje, išskyrus ketvirtąjį kanalą (3.22 pav. a), 3 taškas), ties įrengta atlenkta plokšte susidaro statinio slėgio praretėjimo zona, pirmajame kanale jos plotas yra didžiausias ir ji yra išsidėsčiusi per visą pirmojo kanalo plotį, kur slėgis lygus 548 Pa. Antrajame ir trečiajame kanaluose mažesnio statinio

slėgio sritis užima tik nedidelę dalį ploto arčiau atlenktos plokštelės, kur slėgis lygus 509 Pa.

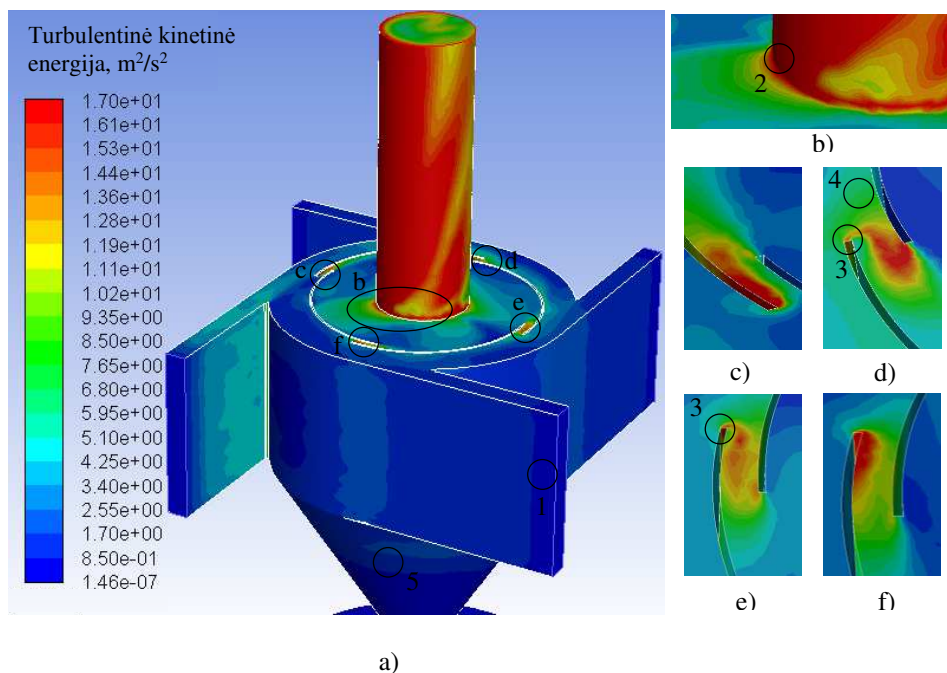
Statinio slėgio pasiskirstymas vidiniame centriniame kanale reikšmingai skiriasi nuo situacijos išoriniuose kanaluose. Pirmiausiai, šiame kanale slėgio vertės yra pasiskirsčiusios 293–450 Pa intervale. Tai pasako apie slopstantį dujų srautą, lyginant su išoriniais kanalais. Didelis skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios vertės gali būti pasekmė to, kad dujų srautai, judantys išoriniuose kanaluose, kurių greitis yra didelis, staigiai patenka į vidinį kanalą. Dėl savo judėjimo trajektorijos aplink centrinę įrenginio ašį toks dujų srautas sudaro slėgio pokyčius visame centriniame kanale. Galima matyti, kad statinis slėgis tarpuose tarp kreivlinijinių elementų pakinta keliskart. Iš pradžių priartėjant prie įtekėjimo į tarpą slėgis lygus 548 Pa (3.22 pav. c), 7 taškas). Judant toliau srauto statinis slėgis sumažėja nuo 528 Pa iki 371 Pa, kol pasiekia tarpžiedinę zoną (3.22 pav. c), 8 taškas). Plote tarp kreivlinijinių elementų statinis slėgis kito 332–371 Pa intervale (3.22 pav. c), 9 taškas), kuris vėl padidėja iki 390 Pa, kai patenka į vidinį centrinį kanalą (3.22 pav. c), 10 taškas).

Dujų srauto statinio slėgio kitimas patobulinto daugiakanalio ciklono ašyje ir dujų srauto pašalinimo ortakyje pateiktas detalizacijoje (3.22 pav. b)). Galima išskirti pagrindines tris sritis: pirmoji – sritis 5 cm atstumu nuo pašalinimo ortakio sienelės, kurioje slėgis kito 332–371 Pa intervale; antroji – pasienio sluoksnis (briauna) su pašalinimo ortakiu, slėgis kito 214–253 Pa intervale; trečioji – dujų srauto pašalinimo ortakis – statinio slėgio vertė lygi –81 Pa. Paskutinioji sritis yra labiausiai praretinta zona visame patobulintame daugiakanaliame ciklone, kurioje vyksta dujų srauto pasiurbimas iš vidinio centrinio kanalo į išmetimo ortakį. Toliau dujų srautui judant išmetimo ortakiu, statinis slėgis nežymiai padidėja ir siekia 18–57 Pa.

Statinio slėgio kitimas žemiau už separavimo kameros dugno plačiai neanalizuojamas, nes abiejose kūginio bunkerio dalyse slėgis sutampa ir yra lygus vidutiniškai 543 Pa (3.22 pav. a), 2 taškas).

Skaičiuojamoji fluidų dinamika yra paremta iteracinio metodo taikymu, gaunant kintamųjų – greičio komponentių, slėgio, energijos ir kt. parametrų vertes bei pasiskirstymą nagrinėjamame lauke, priklausančių nuo ribinių sąlygų, apibūdinančių konkretų uždavinį (Jakštonienė ir Vaitiekūnas, 2009).

Nustatytų kaip optimalių pritaikytų klampos modelių modifikacijos remiasi t. k. e. parametru k , kurio nesąryšiai buvo tiriami kartu su kitais kintamaisiais. Statinio slėgio tyrimai nusako dujų srauto potencinę energiją tiriamajame „kanale“, o k parametras – turbulentinio (pulsuojančio) dujų srauto energijos pernašą. Šiam skirtumui analizuoti buvo sudarytas t. k. e. parametro pasiskirstymas patobulintame daugiakanaliame ciklone (3.23 pav.).



3.23 pav. Agresyviųjų dujų srauto turbulentinės kinetinės energijos pasiskirstymas: a) ties patobulinto daugiakanalio ciklono sienelėmis separavimo kameroje; b) dujų srauto pašalinimo ortakyje; c)–f) tarpuose tarp kreivalinių formos pirmo–ketvirtro elementų (šaltinis: autorius)

Fig. 3.23. Turbulent kinetic energy distribution: a) at the walls of the newly designed multi-channel cyclone's separation chamber; b) in gas flow removal outlet duct; c)–f) in the spaces between 1st–4th curvilinear quarter-ring-formed elements (source: author)

T. k. e. parametrui analizuoti buvo sudarytas spektro pasiskirstymas visoje patobulinto daugiakanalio ciklono konstrukcijoje (3.23 pav. a)), taip pat ties įtekėjimu į išmetamo dujų srauto ortakį (3.23 pav. b)) bei detalizuoti dujų judėjimo procesai tarpuose tarp kreivalinių elementų (3.23 pav. c)–f)).

T. k. e. dydis kito intervale nuo $1,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$ iki $17 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Nepaisant plataus verčių intervalo, galima matyti, kad didžioji dalis patobulinto ciklono patenka į melsvos spalvos spektrą, kuris atitinka vertes nuo $1,7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ iki $4,25 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Mažiausios vertės nustatytos kiekvieno dujų srauto įtekėjimo pradžioje, pvz., 3.23 paveiksl. a), 1 taške, kur vertės yra lygios ne daugiau nei $0,85 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Tai pasako, kad šiose srityse srautas yra mažai turbulentinis, artimas tiesiai srovei, o judėjimo energijos pokyčiai kinta nereikšmingai. Kiekviename kanale yra nustatyta sritis, esanti kanalo pradžioje, einanti per visą kanalo aukštį. Šioje dalyje

t. k. e. vertė lygi $1,7\text{--}2,6 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Pastebėta tokia priklausomybė, kad po pirmojo įtekėjimo ši sritis yra didžiausio ploto, po antrojo – mažesnė ir t. t. Prieinama prie išvados, kad tam turi įtakos įtekėjimo greitis, kuris šiuo atveju yra didžiausias pirmajame įtekėjime, o kiekviename tolesniame įtekėjime mažėja. Dėl dujų srauto greičio pakinta srauto turbulentiškumas ir tuo pačiu t. k. e.

Didžiausia t. k. e. vertė yra nustatyta vidiniame centriniame kanale, o ypač ties įtekėjimu iš separavimo kameros į išmetamo dujų srauto ortakį. Didžiausia vertė yra nustatyta 2 taške (3.23 pav. b)), kuri lygi $17 \text{ m}^2/\text{s}^2$. To priežastimi gali būti laikomas sūkurinis judėjimas ir intensyvus maišymasis centriniame kanale. Taip pat didelę įtaką turi srauto pasiurbimas ties įrenginio ašimi į mažesnio skerspjūvio ortakį – išmetamo dujų srauto ortakį, lyginant su vidiniu centriniu kanalu. Bendrai vertinant centrinį kanalą, t. k. e. vidutinė vertė siekia $3,8 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Tačiau ties kiekvieno ketvirtadalo žiedo formos elemento vidiniu paviršiumi yra nustatytos vertės, siekiančios $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Manoma, kad šios zonos patenka į pasienio zonas, kuriose dujų srauto judėjimas iš viso nevyksta arba yra labai nedidelis.

Vieni iš svarbiausių sričių daugiakanaliame ciklone yra kreivalinijiniai elementai. Tarp šių išdėstytų elementų yra sudaryti tarpai dujų srautui pasidalyti į periferinį ir tranzitinį srautus. Buvo sudaryti t. k. e. pasiskirstymai visose keturiose srityse, kur yra išdėstyti tarpai tarp gretimų kreivalinijinių elementų (3.23 pav. c)–f)).

Atlikus šių zonų analizę buvo prieita prie išvadų, kad didžiausio ploto sritys, kuriose t. k. e. vertės buvo didžiausios, nustatytos dviejose vietose. Pirmą – tarp tarp pirmojo ketvirtadalo žiedos formos elemento ir ketvirtojo, ties pirmojo elemento vidine briauna, kai dujų srautas tranzitine kryptimi juda į centrinį kanalą (3.23 pav. c)). Kita vieta – tarpas tarp trečiojo ir ketvirtojo kreivalinijinių elementų, ties trečiojo elemento vidine briauna, kai dujų srautas periferine kryptimi grįžta iš centrinio kanalo į išorinį ketvirtąjį kanalą (3.23 pav. f)). Abiem atvejais tarpų viduryje t. k. e. vertės siekė $10,2\text{--}11,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Tarpuose tarp kitų kreivalinijinių elementų (3.23 pav. d) ir e)) buvo pastebėta tarpusavyje panaši tendencija, kai dujų srautas buvo nukrypęs periferine kryptimi, o sūkurys susidarė ties ankstesnio kreivalinijinio elemento briauna (3.23 pav., 3 taške). Šiais atvejais vidutinė vertė yra $13,2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, tačiau pirmuoju atveju (3.23 pav. d)) plotas, kuriame judėjimas yra turbulentinis, yra didesnis. T. k. e. vertės sumažėja iki $8,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, kai srautas patenka į sritį, apribotą tik vieno kreivalinijinio elemento paviršiumi, pvz., 3.23 paveikslo d), 4 taške.

Daugiakanalio ciklono kūginiame bunkeryje pastebėta tik keletas sričių, kurios orientuotos $0,1\text{--}0,15 \text{ m}$ lygyje žemiau už separavimo kameros dugno, kiekvieno ciklono kanalo pabaigoje. Šiose bunkerio dalyse didžiausia vertė siekia $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, o vidurkis lygus $1,3 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Žemiau už šios srities, įskaitant ir apatinę bunkerio dalį, vertės sumažėja iki mažiausios nustatytos vertės modelyje, todėl šioms sritims analizė netaikoma.

Efektyviam kietųjų dalelių nusodinimui patobulintame daugiakanaliame ciklone turi įtakos agresyviųjų dujų judėjimo bei kietųjų dalelių judėjimo procesų analizė. Šiam tikslui buvo ištirtos kietųjų dalelių judėjimo trajektorijos nuo jų įtekėjimo iki nusodinimo bunkeryje arba išmetimo per išvalyto dujų srauto pašalinimo ortakį. Yra išnagrinėti atvejai, kai vidutinis kietųjų dalelių skersmuo įtekančiame agresyviųjų dujų sraute yra lygus 1 μm , 2,5 μm , 10 μm ir 70 μm (3.24 pav.).

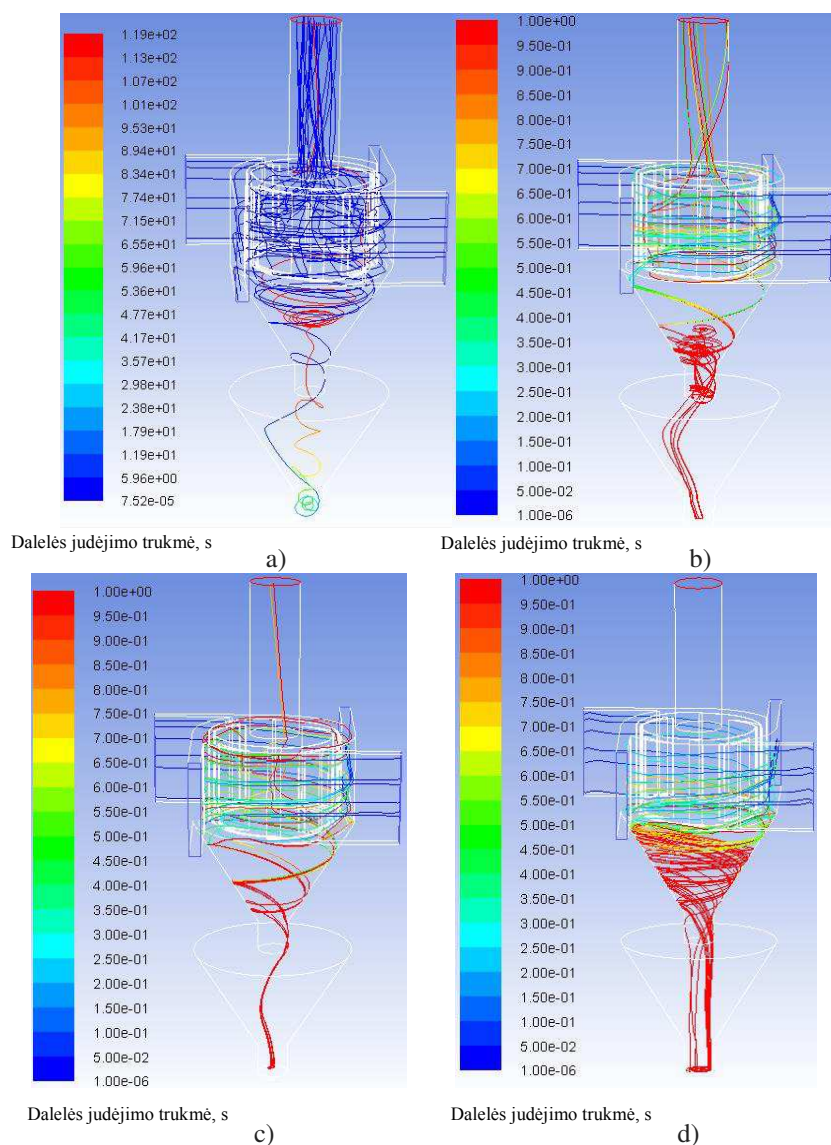
Analizuojant smulkiausias iš pasirinktų – 1 μm skersmens kietąsias daleles buvo sudarytas kietųjų dalelių trajektorijų patobulintame daugiakanaliame ciklone kelias (3.24 pav. a)). Trajektorijos linijos spalva nusako laiką, per kurį kietoji dalelė pasiekė nagrinėjamąjį tašką. Kaip galima matyti 3.24 paveiksle a), SDKD tolygiai pateko į visus ciklono kanalus per ne daugiau nei 5 s laiką. Patekusios į separavimo kamerą apytiksliai 20 % kietųjų dalelių iškart patenka per periferinį plyšį į kūginio bunkerio viršutinę dalį. Kartu su sūkuriumi kietųjų dalelių trajektorija žemėja link dviejų kūginio bunkerio dalių sujungimo ir patenka į kūginio bunkerio apatinę dalį. Į šią vietą kietoji dalelė patenka per 11,9 s po įtekėjimo ir išlieka iki 47,7–71,5 s. Tuomet pagauta sūkurių ji vėl yra nukreipiama link separavimo kameros ir patekusi į centrinį kanalą yra pasiurbiama į išmetimo ortakį, praėjus vos 119 s po jos įtekėjimo.

Pramoninėmis sąlygomis kietųjų dalelių grįžimo į separavimo kamerą bus išvengta, nes bunkerio apatinėje dalyje dažniausiai yra įrengiamas uždoris, o nuolat veikiantis bunkerio iškrovimo įtaisais pašalina iš bunkerio visas susikauptusias kietąsias daleles. Ypač smulkių kietųjų dalelių sugavimo efektyvumą yra įmanoma padidinti įrengus siurblių, kuriuo priverstinai kartu su sugautomis kietosiomis dalelėmis būtų ištraukiamas dujų srautas.

Skaitiniu modeliavimu nustatyta, kad sugautos SDKD sudarė 22,3 % dalį bendro kietųjų dalelių kiekio, įleisto į patobulintą daugiakanalį cikloną. Lyginant su eksperimentinių tyrimų rezultatais, buvo gautas vidutiniškai 4,1 % mažesnis kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas.

Nustatyta, kad nuo 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo iš agresyviųjų dujų srauto procesas patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimuose yra aktualiausias. Pramonės emisijose vis dažniau yra aptinkamos būtent tokio skersmens SDKD, tačiau jas tradiciniai ciklonai gaudo neefektyviai. Atliktų skaitinio modeliavimo tyrimų rezultatai, analizuojant 2,5 μm kietųjų dalelių trajektoriją, pateikti 3.24 paveiksle b), o 10 μm – 3.24 paveiksle c).

Kietųjų dalelių trajektorijos ir skriejimo laikas nuo įtekėjimo iki patekimo į ciklono kanalus yra analogiškas atvejui, nagrinėjant 1 μm skersmens kietąsias daleles.



3.24 pav. Kietųjų dalelių judėjimo trajektorijos ir trukmės esant agresyviųjų dujų srautui patobulintame daugiakanaliame ciklone, taikant modifikuotą $k-\omega$ SST klampos modelį, kai kietųjų dalelių skersmuo yra: a) $1\ \mu\text{m}$; b) $2,5\ \mu\text{m}$; c) $10\ \mu\text{m}$; d) $70\ \mu\text{m}$ (šaltinis: autorius)

Fig. 3.24. The motion trajectories and time of the particles in aggressive gas flow in the newly designed multi-channel cyclone made using modified $k-\omega$ SST viscosity model, the particles diameter is: a) $1\ \mu\text{m}$; b) $2,5\ \mu\text{m}$; c) $10\ \mu\text{m}$; d) $70\ \mu\text{m}$ (source: author)

Kietųjų dalelių, kurių skersmuo $2,5\ \mu\text{m}$ ir $10\ \mu\text{m}$, tekėjimas kanaluose yra panašus tuo, kad trajektorijos yra apskritimo formos bei žemėjančios link separavimo kameros dugno. $2,5\ \mu\text{m}$ skersmens SDKD patenka į kūginės dalies bunkerio viršutinę dalį tik per periferinį plyšį, tuo tarpu apie 20 % kietųjų dalelių, kurių skersmuo $10\ \mu\text{m}$, patenka ir per vidinius kanalų segmentinius plyšius. Taip pat laikas, per kurį $2,5\ \mu\text{m}$ skersmens SDKD pasiekia kūginį bunkerį, yra lygus $0,4\text{--}0,55\ \text{s}$, o $10\ \mu\text{m}$ – $0,45\text{--}0,75\ \text{s}$.

Dėl savo didesnio svorio $10\ \mu\text{m}$ skersmens SDKD yra linkusios ilgesnį laiką išbūti separavimo kameroje – iki $0,9\ \text{s}$, tuo metu apie 30 % kietųjų dalelių yra išmetamos kartu su išeinančiu dujų srautu, o likusi dalis, vėl patekusi per plyšius, patenka į bunkerį, kuriame išlieka. Visas nusodinimo procesas trunka vidutiniškai apie 1 sekundę. Tarp šių dydžių kietųjų dalelių yra pastebėta keletas pagrindinių skirtumų. Pirmasis – SDKD, kurios yra pašalinamos per išeinančio dujų srauto ortakį, juda labiausiai palei periferinę sienelę, o vėliau staigiai yra pakeliamos srautu ir įsiurbiamos į ortakį. Didesnės, t. y. $10\ \mu\text{m}$ skersmens SDKD, patenkančios į pašalinamo dujų srauto ortakį, juda ciklono kanalais, patenka su periferiniu srautu į vidinį centrinį kanalą ir tik artėdamos link ciklono ašies yra pakeliamos sukuriu ir išmetamos iš separavimo kameros su dujų srautu.

Tokių procesų priežastimi gali būti laikoma tai, jog stambesnes kietąsias daleles dujų srautas, judantis toliau nuo įrenginio ašies, pakelti nėra pajėgus, tačiau toks srautas sugeba pernešti smulkias, pvz., $2,5\ \mu\text{m}$ ir mažesnio skersmens kietąsias daleles.

Sūkurinis srautas, judantis patobulinto ciklono ašyje, yra kylančios trajektorijos ir didelės kinetinės energijos, todėl toks srautas sugeba ne tik pernešti, bet ir pakelti bei ištraukti kietąsias daleles, kurių skersmuo siekia $10\ \mu\text{m}$. Kietųjų dalelių judėjimo tyrimų rezultatais nustatyta, kad $10\ \mu\text{m}$ skersmens kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas buvo vidutiniškai 1,7 karto didesnis ir siekė 71,9 %, nei $2,5\ \mu\text{m}$ kietųjų dalelių, kurios buvo sugautos 41,3 % efektyvumu. Lyginant su eksperimentinių tyrimų rezultatais, pastebėta, kad kuo kietųjų dalelių skersmuo yra didesnis, tuo yra mažesnis tarp tyrimų gautas neatitikimas. Eksperimentiškai buvo gautas vidutinis 46,9 % ir 78 % sugavimo efektyvumas atitinkamai $2,5\ \mu\text{m}$ ir $10\ \mu\text{m}$ skersmens kietosioms dalelėms. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad $10\ \mu\text{m}$ SDKD šalinimo efektyvumas buvo apytiksliai 1,1 karto mažesnis nei bendras valymo efektyvumas. Remiantis šiuo santykiu, daroma analogiška prielaida atliktiems modeliavimo tyrimams. Tuomet bendras valymo efektyvumas yra lygus 79,1 % (atsižvelgiant į $10\ \mu\text{m}$ SDKD šalinimo efektyvumą, kuris lygus 71,9 %). Apskaičiuota, kad visais atvejais skaitinio modeliavimo būdu gautas kietųjų dalelių sugavimo efektyvumas buvo mažesnis nei gautas eksperimentiškai, o vidutinis neatitikimas lygus 11,8 %. Atskirai vertinant $2,5\ \mu\text{m}$ skersmens kietąsias daleles, šalinimo efektyvumo rezultatų neatitikimas siekė 12 %, o $10\ \mu\text{m}$ skersmens kietųjų dalelių – 7,8 % (3.24 pav.).

Papildomai analizuojant smulkiadisverses kietąsias daleles buvo atliktas skaitinis modeliavimas, siekiant nustatyti kritinį SDKD skersmenį, kuriam esant visos SDKD bus sugautos bunkeryje. Nustatyta, kad įleidžiant kartu su agresyviųjų dujų srautu kietąsias daleles, kurių dydis siekia 70 μm , nei viena kietoji dalelė nebuvo patekusi į dujų srauto pašalinimo ortakį. Visų kietųjų dalelių pašalinimas truko ne ilgiau nei 1 s. Pagal pavaizduotus kontūrus galima matyti, kad iškart po įtekėjimo į patobulinto daugiakanalio ciklono kanalus kietųjų dalelių trajektorijų linija buvo žemėjanti ir SDKD, patekusios per išorinį ištininį periferinį plyšį, per 0,6–0,85 sekundes pateko į kūginį viršutinės dalies bunkerį. Po apytikriai 0,1–0,2 s visos patekusios SDKD iš viršutinės dalies bunkerio pateko į apatinės dalies bunkerį. Apskaičiuotas 70 μm skersmens kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas siekė 99,4 %. Yra daroma prielaida, kad likusią dalį galima laikyti sisteminė paklaida, t. y. SDKD, kurias skaitinio modeliavimo programa įvertino kaip įleistą kartu su agresyviųjų dujų srautu, tačiau nepatekusias nei per ištekėjimą, nei buvusias sugautas bunkeryje.

3.9. Inžineriniai sprendimai

Atlikus kompleksinius eksperimentinius ir teorinius tyrimus, kuriant naujos kartos konstrukcijos ciklono pritaikyto kietųjų dalelių šalinimui iš agresyviųjų dujų srauto, sukurtas pramoninis bandomasis daugiakanalio ciklono variantas, remiantis patobulinto daugiakanalio ciklono prototipu. Šis valymo įrenginys geba sugaudyti smulkiadisverses kietąsias daleles, esančias agresyviųjų dujų sraute, kuris pasižymi aukšta temperatūra ir dideliu drėgniu (esant 50 °C temperatūrai didžiausias pasiekiamas 95 % santykinis drėgnis, o 200 °C – 6,6 %) bei jame esančiais cheminiais junginiais, kurie dėl padidintų kietųjų dalelių adhezinių ir autohezinių jėgų padeda išvengti įrenginio užsikimšimo. Yra gautas patentas „Daugiakanalis ciklonas – filtras agresyvioms dujoms nuo kietųjų dalelių valyti“. Valstybinis patentų biuras. Patentu Nr. LT 6479 B (Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2017).

Tradicioniai daugiakanaliai ciklonai gali būti taikomi agresyviosioms (padidintos temperatūros ir aukšto drėgnio) dujoms nuo kietųjų dalelių valyti. Šalinant lipnias kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų srauto, esant aukštam drėgniui, padidintai temperatūrai ir dujų sraute esančių cheminių junginių faktoriams, ciklono sistema užsikemša per trumpą laikotarpį ir valymo procesas nebevyksta. Įrenginio regeneruoti praktiškai neįmanoma. Todėl, norint išvengti sistemos užsikimšimo ir ypač efektyviai išvalyti dujų srautą nuo smulkiadispersių kietųjų dalelių, įrenginio eksploatavimas reikalauja papildomų konstrukcinių sprendimų.

Trimatė patobulinto daugiakanalio ciklono schema pateikta 3.25 paveiksle.

Daugiakanalį cikloną – filtrą agresyviosioms dujoms nuo kietųjų dalelių valyti sudaro sumontuoti keturi (ir daugiau) oro įtekėjimai, išdėstyti tolygiais (pvz., kas 90°) kampais, kurie, išskirstyti į pirminį (2) ir antrinius (3) yra sujungti bendru tangentiniu būdu įrengtu ortakiu (1). Išvalytas dujų srautas yra pašalinamas pro ortakį, įrengtą ciklono ašyje virš separavimo kameros dangčio. Patobulinto daugiakanalio ciklono korpuse (4) yra sumontuoti išdėstyti su tarpais vienodo spindulio ir ilgio išlenkti ketvirtadalio žiedo formos elementai (6) su jose išpjautomis angomis (10) ir atlenktomis plokštelėmis (11) (3.25 pav.).

Agresyviųjų dujų–garų ir juose esančių kietųjų dalelių srautas patenka pro užteršto dujų srauto ortakį pirminiu ir antriniais srautais. Ciklono korpuse ant nuožulnaus dugno (5) yra sumontuoti išlenkti kreivalinijinės ketvirtadalio žiedo formos elementai. Šie elementai sudaro ciklono išorinius kanalus (7), pirmasis – ketvirtasis elementai turi vienodus spindulius. Pirmasis yra sumontuotas ties pirminiu srauto įtekėjimu, o antrasis ir tolesni – kas 90° kampu dujų tekėjimo kryptimi (3.25 pav.).

Veikimo principas. Išskirstytas bendras dujų srautas patenka į išorinius (pirmas–ketvirtas) kanalus pro pirminį ir antrinius įtekėjimus, taip yra palaikomas vidutinis dujų srauto greitis visuose kanaluose, kas 90° kampu išdėstytuose įtekėjimuose periferinėje sienelėje. Atskirtos iš agresyviųjų dujų srauto SDKD slenka periferine sienele žemyn, veikiant svorio jėgoms, ir patenka pro ištisinį plyšį su dugno tvirtinimo elementais į bunkerį.

Veikiant išcentrinei jėgai, SDKD nukreipiamos į išorinį ištisinį žiedinį plyšį (3.25 pav., 8 taškas) ir į segmentinius vidinius centrinio kanalo segmentinius persidengiančius plyšius (3.25 pav., 9 taškas) ir patenka į bunkerį (3.25 pav., 3 taškas) arba kaupimo talpą (maišą), o toliau judantis dulkėtas oras juda kitais kanalais ir patenka į išvalyto dujų pašalinimo ortakį. Judantis dujų srautas, pasiekęs ketvirtadalio žiedo formos elemento briauną, dalijasi į du srautus – periferinį ir tranzitinį. Naujai atitekančias užterštas agresyviųjų dujų srautas susiduria su periferiniu iš dalies išvalytu srautu iš ankstesnio kanalo ir papildomai atskiria esančias kietąsias daleles ir nukreipia jas į segmentinius persidengiančius plyšius.

Antriniai dujų srauto įtekėjimai. Įtekėjimo angos įrengtos ties kiekvieno ketvirtadalio žiedo formos elemento pradžia. Proporcingai skerspjūviams dujų srautas iš kiekvieno antrinio įtekėjimo angos patenką į atitinkamą ciklono kanalą, papildo judantį jame srauto debitą.

Dujų srauto nuotėkis ir debitas ties kiekvienu ketvirtadalio žiedo formos dviejų gretimų elementų persidengimu kaip tranzitinis srautas sumažėja. Todėl naujai atitekančias pro kiekvieną antrinio įtekėjimo angą srautas papildo ir išlygina dujų srautą atitinkamame ciklone kanale. Esant 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, pokytis tarp didžiausios ir mažiausios verčių yra

1,91 karto. Tai įrodo, kad šiam atvejui esant, greičiai visuose ciklono kanaluose kinta tolygiai, be staigių pokyčių, todėl agresyviųjų dujų trajektorijos yra palankios efektyviam kietųjų dalelių šalinimui. Pro antrinių įtekėjimų angas yra tiekiamas tolygiai išskaidytas ir į dalinius srautus praskiestas agresyviųjų dujų srautas, kurio bendra kietųjų dalelių koncentracija yra padalyta tarp keturių atskirai įeinančių srautų. Tokiu būdu dalis dulkėto srauto yra nukreipiama į tolesnius kanalus ir sumažina adheziją, autoheziją, sumažina lipnių dalelių kaupimąsi ant vidinių ciklono paviršių, ir tokiu būdu yra išvengiama ciklono sistemos užsikimšimo.

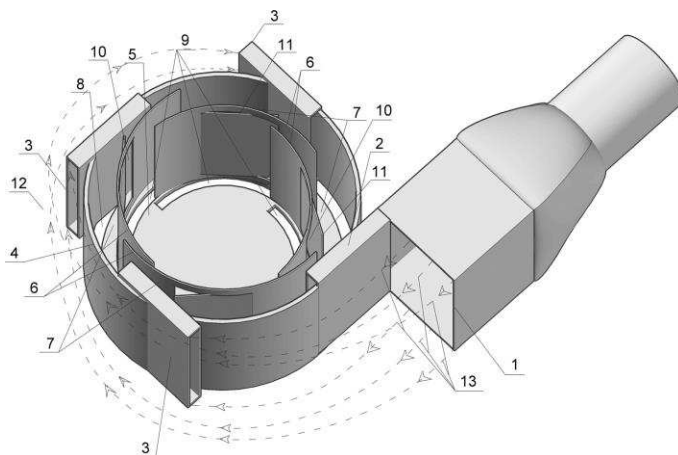
Panaudojus antrinius srautų įtekėjimus, agresyviųjų dujų srautas, nukreiptas į cikloną, pasiskirsto tolygiai per visus antrinius įtekėjimus proporcingai jų skerspjūviams, judant antrinių srautų trajektorijų linijomis (3.25 pav., 12 taškas).

Ketvirtadalio žiedo formos elementai. Elementai yra vienodo spindulio ir ilgio, jie išdėstyti ciklono vidinėje konstrukcijoje taip, kad būtų sudaryti tolygūs vienodo skerspjūvio ploto kanalai. Pastarųjų elementų sienelėse esančios angos sudaro galimybę kietosioms dalelėms grįžti į ankstesnį kanalą, patekti per segmentinius persidengiančius plyšius į bunkerį arba kaupimo talpą (maišą) ir tokiu būdu padidinti valymo efektyvumą iki 5–10 %, lyginant su ištisiniais ketvirtadalio žiedo formos elementais (nesant įrengtoms angoms).

Šios angos yra kiekviename ketvirtadalio žiedo formos elemente su atlenkta plokšte, kuri nukreipia dulkėtą srautą į ankstesnį kanalą. Kaip optimalus prototipo atvejis nustatytas vienodo 50:50 % periferinio ir tranzitinio dujų srauto pasiskirstymo santykio atvejis ir ketvirtadalio žiedo formos elementų su atlenktomis plokštelėmis išdėstymas vienodam periferiniam ir tranzitiniam srautui sudaryti. Toks dujų srautų pasiskirstymas nustatytas kaip optimalus, ištyrus papildomai 25:75 % ir 75:25 %. Dėl pasikeitusio periferinio ir tranzitinio srautų santykio iki 5–7 % sumažėja ne tik kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas, tačiau ir atskirais atvejais padidėja aerodinaminis pasipriešinimas apie 10 % (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015b).

Separavimo kameros išgaubtas dugnas. Dugnas yra išgaubtas žemyn nuo ciklono ašies iki periferijos. Nuožulnis dugnas įrengiamas tokiu būdu, kad susikaupusios SDKD galėtų lengviau judėti į bunkerį arba kaupimo talpą (maišą) ir nesikaupytų ant dugno paviršiaus, o slinktų link periferinio žiedinio plyšio.

Ciklono separavimo kameroje įrengtas išgaubtas žemyn nuo ciklono ašies iki periferijos dugnas, kurio nuožulnumo kampas sudaro 20–30° su horizontalia plokštuma. Ciklono separavimo kameros išgaubtas dugnas atskirtas nuo periferinės separavimo kameros sienelės išoriniu ištisiniu žiediniu plyšiu, taip pat dugne (5) padaryti segmentiniai vidiniai centrinio kanalo persidengiantys plyšiai, skirti kietosioms dalelėms pašalinti iš visų daugiakanalio ciklono kanalų ir kaupiti jas bunkeryje arba kaupimo talpoje (maiše).



3.25 pav. Patobulinto daugiakanalio ciklono su antriniais dujų įtekėjimais trimatis (3D) vaizdas: 1 – užteršto dujų srauto ortakis; 2, 3 – pirminis ir antriniais dujų įtekėjimai; 4 – ciklono korpusas; 5 – išgaubtas separavimo kameros dugnas; 6 – išlenkti konfigūruoti kreivalinijinės ketvirtadalio žiedo formos elementai; 7 – ciklono išoriniai kanalai; 8 – išorinis ištisinis žiedinis plyšys; 9 – vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai; 10, 11 – ketvirtadalio žiedo formos elementuose išpjautos angos ir atlenktos 5° kampu plokštelės; 12 – antrinių srautų trajektorijų linijos; 13 – įtekančio dujų srauto trajektorijų linijos (šaltinis: autorius)

Fig. 3.25. Newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets 3D view: 1 – dusted gas flow inlet duct; 2, 3 – primary and secondary flow inlets; 4 – cyclone body; 5 – convex bottom of separation chamber; 6 – configured curved quarter-ring-formed elements; 7 – cyclone's external channels; 8 – outer ringed continuous slit; 9 – segmental ringed overlaid slits; 10, 11 – opening slots with 5° angle folded plate in the quarter-ring-formed elements; 12 – secondary flow guide; 13 – inlet flow guide (source: author)

Ištisinis žiedinis plyšys ir vidiniai segmentiniai plyšiai. Ištisinio plyšio su tvirtinimo elementais daugiakanaliame ciklone pranašumas tas, kad dujų valymo metu agresyviosiose dujose esančios SDKD nesikaupia tarpuose tarp plyšių, kaip esant segmentinių plyšių atveju. Standumui užtikrinti separavimo kameros dugnas yra įrengiamas, tvirtinant jį prie laikymo elementų, kurių plotis 5 mm ir yra labai mažas, palyginti su išorinio ištisinio plyšio ilgiu.

Ketvirtadalio žiedo formos elementuose išpjautos angos ir atlenktos plokštelės nukreipia dujų srautą link išorinio ištisinio žiedinio plyšio ir segmentinių vidinių centrinio kanalo segmentinių persidengiančių plyšių.

Sukurtas patobulintas pramoninis bandomasis daugiakanalis ciklonas pavaizduotas 3.26 pav.

SDKD pro šias angas patenka į bunkerį, kur jos yra kaupiamos. Pro įrengtą periferinį žiedinį plyšį SDKD gali patekti į bunkerį iš išorinių kanalų, t. y. pirmojo–ketvirtojo, o nusodinamos vidiniame centriniame kanale, gali patekti į bunkerį arba kaupimo talpą (maišą) pro vidinius centrinio kanalo segmentinius plyšius, kurie įrengti 10 mm atstumu nuo ketvirtadalio žiedo formos elemento vidinio (įgaubto) paviršiaus.



3.26 pav. Patobulintas pramoninis bandomasis daugiakanalis ciklonas: a) vaizdas iš šono; b) ir c) profilio vaizdai; d) vidinė konstrukcija, esant atidengtam separavimo kameros dangčiui: 1 – išvalyto dujų srauto pašalinimo anga; 2 – separavimo kamera; 3 – bunkeris; 4 – pirminis dujų įtekėjimas į pirmą kanalą; 5–7 – antriniai dujų įtekėjimai atitinkamai į antrą–ketvirtą kanalą; 8 – išorinis ištinis žiedinis plyšys; 9 – vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai; 10 – išgaubtas separavimo kameros dugnas (šaltinis: autorius)

Fig. 3.26. Newly designed industrial pilot multi-channel cyclone: a) sideview; b) and c) profile views; d) inner structure at uncovered separation chamber: 1 – cleaned gas flow removal outlet hole; 2 – separation chamber, 3 – hopper 4 – primary gas flow inlet; 5-7 – secondary gas flow inlets to the 2nd–4th cyclone's channel respectively; 8 – outer ringed continuous slit; 9 – segmental ringed overlaid slits; 10 – convex bottom of separation chamber (source: author)

Vidiniame centriniame kanale judančiame dujų sraute esančios smulkesnės kietosios dalelės yra nusodinamos, patekus pro vidinius centrinio kanalo segmentinius persidengiančius plyšius, taip išvengiama jų adhezijos ant vidinio centrinio kanalo paviršių, dalelių kaupimosi ant separavimo kameros dugno, taip pat padidėja dulkėtų dujų išvalymo laipsnis. Išpjauti vidiniai segmentiniai persidengiantys plyšiai padidina dujų srauto greitį ciklono kanaluose 2–3 %. Įrengtas išorinis ištisinis žiedinis plyšys buvo praplatintas iki 30 mm pločio – apytikriai pusės kanalo pločio. Esant tokiam pločiui, dalelių kaupimasis (adhezijos sluoksnio storis) sumažėja iki 2 kartų, lygiant su atveju kai buvo įrengtas 15 mm pločio ištisinis žiedinis plyšys, arba iki 5 kartų – įrengiant 5 mm segmentinius žiedinius plyšius.

Paviršiaus glotnumas. Kietųjų dalelių šalinimo iš agresyviųjų dujų proceso metu, taikant prototipą, yra susiduriama su problemomis, susijusiomis su konstrukcijos užsikimšimu dėl dalelių adhezijos ir autohezijos. Šiems reiškiniams išvengti gali būti taikomi glotnaus paviršiaus metalų paviršiai, pavyzdžiui, nerūdijantis plienas, o taip pat yra taikomas daugiakanalio ciklono vidinių paviršių apdorojimas – poliravimas (šlifavimas) arba padengimas (dažymas) trintį mažinančiomis medžiagomis.

Šis metodas gali būti taikomas, esant iki 400 °C temperatūrai, aktyvi medžiaga yra hidrofobiška, valant dujų srautą nuo nedidelio tankio ir kietumo kietųjų dalelių, pavyzdžiui, medienos, lignino, gipso, grafito ir pan.

Neapdorotų juodojo metalo, cinkuotos skardos ir nerūdijančio plieno konstrukcijos vidinių elementų glotnumas po šlifavimo smėliasrove gali būti padidintas nuo 1,2 iki 2 kartų, o padengus laku – nuo 2,5 iki 9 kartų. Patobulintas pramoninis bandomasis daugiakanalis ciklonas pagamintas iš nerūdijančio plieno, kurio vidiniai paviršiai yra padengti karščiui ir dilimui atspariu laku, o šių paviršių profilio aukščio vidutinė vertė lygi 0,089 μm , t. y. ne mažiau kaip 6,5 karto mažesnė nei daugiakanalio ciklono prototipo.

Patobulinto pramoninio bandomojo daugiakanalio ciklono matmenys: cilindrinio korpuso skersmuo – 0,53 m, bendras ciklono aukštis (su dviejų dalių kūginiu bunkeriu) – 1,10 m, srauto išteklėjimo angos skersmuo – 0,16 m, srauto įtekėjimo angos skersmuo – 0,16 m. Įtekėjimo anga iš ortakio į cikloną sudaryta iš įtekėjimo į pirmąjį kanalą – pirminio dujų srauto įtekėjimo, kurio matmenys – 0,040×0,29 m ir sujungtų trijų antrinių dujų srauto įtekėjimų į vieną bendrą ortakį, kurio matmenys – 0,12×0,29 m. Įrengto išorinio ištisinio žiedinio plyšio plotis lygus 0,03 m, o vidinių kanalų segmentinių žiedinių persidengiančių plyšių plotis – 0,005 m. Kiekvienas iš antrinių dujų srauto įtekėjimų ties kiekvienu 90° kampo posūkiu yra nuosekliai atjungtas nuo bendro ortakio ir jo anga nukreipta į atitinkamą ciklono kanalą.

Pagal atliktus tyrimus nustatyta, kad įrenginio vidiniai elementai turi būti pagaminti iš nerūdijančio plieno – ne mažesnės nei taikomos AISI 304 (EN 1.4306) markės metalo glotnumo klasės. Pasirinktas metalo storis sukurtam patobulinto

pramoninio bandomojo daugiakanaliam ciklonui lygus 0,002 m. Optimalus agresyviųjų dujų srauto greitis ciklono kanaluose lygus 12 m/s, o tai atitinka $1290 \text{ m}^3/\text{val.}$ valomo dujų srauto debitą, tuomet įrenginio aerodinamis pasipriešinimas siekia 225 Pa. Didžiausias pasiekiamas efektyvumas siekia 88,2 %, sugaudant lignino SDKD. Medienos ir medienos pelenų šalinimo efektyvumas atitinkamai lygus 86,4 % ir 83,6 %. Esant $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ bendrai kietųjų dalelių koncentracijai prieš patobulintą daugiakanalį cikloną, SDKD, kurių skersmuo yra 10 μm , yra sugaudoamos vidutiniškai 80 % efektyvumu, 2,5 μm – 49,7 %, o 1 μm – 27,6 %.

3.10. Trečiojo skyriaus išvados

1. Praleidus $150\,000 \text{ m}^3$ dulkėtų agresyviųjų dujų, patobulintame daugiakanaliame ciklone su antriniais įtekėjimais žymaus SDKD kaupimosi yra išvengiama. Ant neapdoroto nerūdijančio plieno ketvirtadalio žiedo formos elementų ir ant separavimo kameros dugno susidaro ne daugiau nei 1 mm kietųjų dalelių sluoksnis. Ant lakuotų patobulinto daugiakanalio ciklono vidinių elementų paviršių pastebimos tik pavienės kietosios dalelės, kurių įtakos įrenginio veikimui galima nepaisyti.

2. Smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas iš agresyviųjų dujų srauto vidutiniškai padidėja 1,1 %, esant 1–4 g/m^3 acetono koncentracijai užterštame dujų sraute. Esant 2 g/m^3 acetono koncentracijai, ciklono darbo trukmės įtaka smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumui didžiausia. Anglies monoksidu, kurio koncentracija siekia 1–4 g/m^3 , užterštas agresyviųjų dujų srautas nereikšmingai sumažina smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą. Nustatyta, kad smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo iš dujų chemiškai užterštų anglies monoksidu efektyvumą sumažina labiausiai, t. y. 1,2 %, praėjus 3 darbo valandoms – 82,4 %, kuris ir vėliau išlieka pastovus.

3. Nerūdijančio plieno profilio glotnumas gali būti padidintas panaudojant karščiui ir dilimui padidinto atsparumo laką, tuomet vidutinė nelygumų vertė nesiekia 0,09 μm . Apdoroto smėliasrove ar padengto laku cinkuotos skardos ar juodojo metalo paviršių nelygumų vidutinės vertės apytikriai 2,3 karto didesnės, lyginant su nerūdijančio plieno paviršiumi. Rezultatais nustatyta, kad mikroplyšiai, esantys nerūdijančio plieno paviršiuje nėra reikšmingi. Cinkuotos skartos ir juodojo metalo paviršiai turi daug įtrūkimų ir žymių nelygumų, kuriuos pašalinti labai sudėtinga. Todėl jų papildomas apdorojimas nors ir padidina jų paviršių glotnumą išlyginant nelygumus, tačiau neprilygsta nerūdijančio metalo glotnumui.

4. Apskaičiuota, kad agresyviųjų dujų sraute esančias 10 μm kietąsias daleles labiausiai veikia išcentrinė–filtravimo jėga periferiniame sraute bei adhezijos–

kapiliarinė tranzitiniame sraute. Išcentrinė–filtravimo jėga siekia iki 600 pN, kai tuo tarpu adhezijos–kapiliarinė jėga silpnesnė apytikriai 3,2 karto.

5. Didžiausias dujų srauto greitis pasiekiamas patobulintame daugiakanaliame ciklone kinta 15,9–17,4 m/s intervale, didžiausios vertės nustatytos pirmame ciklono kanale, o daugiakanaliame ciklone, kur įrengtas vienas įtekėjimas – 13,1–14,9 m/s. Didesnis greitis sąlygoja intensyvių dalelių nusodinimą šioje zonoje, o taip pat yra palankus adhezijai išvengti. Antrojo ir trečiojo kanalų pradžioje naujos konstrukcijos ciklone greitis sumažėja 36–60 %. Dujų srauto greitis kanalų viduryje apytiksliai 40 % didesnis nei pradžioje ir 20 % mažesnis nei kanalų pabaigoje. Tokiu būdu yra mažinama adhezijos tikimybė ant siaurėjančio kanalo sienelių. Ketvirtajame kanale greičio vertės abiejuose ciklonuose išsilygina ir skiriasi vidutiniškai 10 %. Pritaikyti antriniai įtekėjimai išlaiko tolygų srauto pasiskirstymą visuose ciklono kanaluose, o taip išvengiama papildomų sukurinių srautų, neigiamai veikiančių smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo procesą.

6. Patobulinto daugiakanalio ciklono aerodinaminis pasipriešinimas pasiekia 335 Pa, esant 16 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose. Tokiu būdu patiriami energijos nuostoliai, reikalaujantys didesnio našumo įrangos tiekiamam slėgiui užtikrinti yra mažesni, apytikriai 22 % nei vieno įtekėjimo ciklono. Esant mažesniems dujų srauto greičiams ciklone, t. y. 8–12 m/s, naujos konstrukcijos daugiakanalio ciklono sistemoje aerodinaminis pasipriešinimas yra vidutiniškai 5–15 % didesnis nei daugiakanalio ciklono, todėl šie atvejai galimi tik kaip alternatyvūs. Įleidžiant į daugiakanalį cikloną virš 100 °C temperatūros ir daugiau nei 95 % drėgnio agresyviųjų dujų srautą, aerodinaminis pasipriešinimas apytikriai 10 % didesnis nei esant neagresyviųjų dujų srauto atvejui. Todėl taikant cikloną mišriam taikymui, yra reikalingas dujų srauto reguliavimas, priimanč nominalų slėgio poreikį, atsižvelginat į slėgio nuostolius esant agresyviųjų dujų srautui.

7. Esant vidutiniam 12 m/s dujų srauto greičiui ciklone, užteršto smulkiadispersėmis mažesnėmis nei 20 µm skersmens lignino kietosiomis dalelėmis, valymo efektyvumas agresyviosios aplinkos sąlygomis siekia iki 82,5 %, praleidus 30 000 m³ agresyviųjų dujų, o esant neagresyviai aplinkai, nustatytas valymo efektyvumas vidutiniškai 5 % didesnis. Vieno lygio keturkanalio ciklono konstrukcijai, esant kondensacijos reiškiniams įsotinto dvifazio garų–KD sraute, rekomenduojama parinkti 30 mm pločio segmentinius žiedinius plyšius, norint išvengti valymo įrenginio sistemos užsikimšimo lignino ar panašių fizikinių savybių turinčiomis kietosiomis dalelėmis.

8. Atskirų frakcijų kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas didžiausias panaudojant lignino ir medienos kietąsias daleles. Tyrimais nustatyta, lignino, medienos ir medienos pelenų kietųjų dalelių, kurių dydis siekia 10 µm, šalinimo efektyvumas siekia iki 81,3 % esant apie 800 mg/Nm³ koncentracijai, o 2,5 µm

skersmens dalelėms – atitinkamai iki 50,5 %. Esant apie 2,5 karto mažesnei bendrai kietųjų dalelių koncentracijai prieš cikloną – 300 mg/Nm³, 10 μm skersmens kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas sumažėja nuo 2,5 iki 5 %, o 2,5 μm skersmens – nuo 5 iki 6,5 %.

9. Atlikus skaitinio modeliavimo rezultatų analizę nustatyta, kad zonos, kuriose adhezija yra labiausiai tikėtina, išsidėsčiusios ties periferine sienele ir ketvirtadalio žiedo formos elemento išoriniu paviršiumi, kuriose dujų srauto greitis yra ne didesnis nei 1,6 m/s. Stiprus sūkuriniai srautai, turintys neigiamos įtakos nusodinimo efektyvumui susidaro ties vidiniu ketvirtadalio žiedo formos elemento išoriniu paviršiumi, už pasienio sluoksniu, kur didžiausias dujų srauto greitis siekia 13,6–16 m/s, tuo atveju eksperimentiniais tyrimais didžiausias dujų srauto greitis siekė 17,6 m/s, t. y. santykinė paklaida neviršija 9 %.

10. Atlikus skaitinį modeliavimą nustatyta, kad didžiausios dujų srauto statinio slėgio zona yra ties įtekėjimo ortakiu į cikloną bei pirmo kanalo pradžioje, kur vertės siekia 310–336 Pa, o po šios zonos slėgis mažėja. Dėl tokio slėgio pasiskirstymo sąlyginai mažos masės 1–2,5 μm dydžio kietųjų dalelių judėjimo trajektorija pakeičiama dujų srautu, jos nukreipiamos link ciklono ašies ir nusodinamos mažiau efektyviai nei lyginant su 10 μm dalelėmis. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad statinis slėgis prieš cikloną siekia iki 640 Pa, tačiau atkarpoje iki antrojo kanalo sumažėja 50 %. Taip pat pastebėta, kad apytiksliai 50 mm atstumu prieš kiekvieną kreivalinijinio elemento briauną vyksta intensyvus srautų maišymasis, trikdantis naujai atitekančio labiau užteršto srauto filtravimo procesą, o statinio slėgio vertės kinta 162–216 Pa ribose.

11. Antrinių dujų srauto įtekėjimų taikymas turi įtakos ne tik dalelių adhezijos mažinimui esant agresyviųjų dujų srautui, bet ir sudaromam daugiakanalio ciklono dujų srauto slėgio kritimui, kuris turi būti vertinamas kaip papildomas valymo įrenginio pranašumas. Aukštas valymo efektyvumas leidžia taikyti patobulintą daugiakanalį cikloną kietosioms dalelėms šalinti kaip įprastomis sąlygomis, o ilgalaikis testavimas – praleidžiant 150 tūkst. m³ dulkėtų agresyviųjų dujų – patvirtina valymo įrenginio gebą jį naudoti agresyviųjų dujų valymui.

Bendrosios išvados

1. Išanalizavus mokslinę literatūrą, nustatyta, kad yra atlikta daug tyrimų, kuriuose, tiriant neagresyviųjų dujų sraute esančių smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumą, nagrinėjami patobulintos konstrukcijos ciklonai ir daugiakanaliai ciklonai. Tačiau smulkiadispersėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų srauto šalinti technologijų tyrimai pasaulyje atlikti tik sprendžiant valymo įrenginių aprasojimo problemas, tobulinant ciklonų konstrukcijas dalelėms iš kombinuoto tipo dujinė-skysta fazė šalinti, didinant bendrą valymo efektyvumą, o realizuotų technologinių sprendimų daugiakanaliuose ciklonuose kietųjų dalelių adhezijai išvengti neaptikta.

2. Parengtos tyrimų metodikos, kuriomis remiantis galima šalinti kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų srauto, kai temperatūra siekia 145 °C, o santykinis drėgnis – daugiau nei 95 %. Be to, parinktos sukurto eksperimentinio patobulinto daugiakanalio ciklono stendo konstrukcinės ir aerodinaminės parametrai charakteristikos. Buvo ištirtos lignino, medienos ir medienos pelenų 2,5 μm, 10 μm ir suminės frakcijų smulkiadispersės kietosios dalelės, kurių bendrasis tankis siekia 600–1000 kg/m³ ir sukurta jų šalinimo efektyvumo tyrimų metodika, taikant svorio metodą. Teoriškai gautos dujų srauto santykinio drėgno ir greičio matematinės priklausomybės nuo agresyviųjų dujų srauto parametrai, bei nustatyta anglies monoksido ir acetono įtaka kietųjų dalelių šalinimo procesui. Parinktas

optimalus iš sudarytų skaitinių nagrinėjamo objekto modelių bei išanalizuoti kietųjų dalelių šalinimo ir dujų judėjimo procesai, gautas jų grafinis vaizdas.

3. Lyginant su normaliomis sąlygomis (priimant prielaidą, kad temperatūra yra lygi 0 °C, o santykinis drėgnis lygus 50 %), drėgno dujų srauto tankis sumažėja nuo 1,295 kg/m³ iki 1,280 kg/m³, dinaminė klampa padidėja nuo 17,17 μPa·s iki 24,99 μPa·s, o kinematinė klampa padidėja nuo 13,25 mm²/s iki 19,52 mm²/s.

4. Daugiakanaliai ciklonai nėra tinkami eksploatuoti esant agresyviųjų dujų srautui (kai temperatūra siekia nuo 50 iki 200 °C, santykinis drėgnis – daugiau nei 95 %, o dujų sraute yra cheminių junginių), nes valymo proceso metu jie užsikemša. Praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, vidiniai elementai pasidengia 5–20 mm kietųjų dalelių sluoksniu – tai sumažina didžiausią daugiakanalio ciklono valymo efektyvumą nuo 90,5 % iki 77,6 %, o aerodinaminį pasipriešinimą padidina iki 15 %.

5. Iširta, kad kietųjų dalelių adhezija gali būti sumažinta apytiksliai iki 90 % (nuo 4 cm dalelių sluoksnio storio iki 0,5 cm), taikant metalo paviršiaus šlifavimą smėliasrove, kaip ilgalaikį būdą daugiakanalio ciklono vidinių elementų glotnumui padidinti, kai vidutinė apdoroto profilio aukščio vertė siekia 0,45 μm. Trumpalaikiam apdorojimo būdai priskiriamas lakavimas, kai adhezijos sąlyginai išvengiama, o vidutinė profilio aukščio vertė neviršija 0,16 μm. Šlifavimas vidutinį aritmetinį profilio nuokrypį sumažina nuo 1,2 iki 2 kartų, o lakuojant paviršių – nuo 2,4 iki 9 kartų. Todėl neapdoroto nerūdijančio plieno paviršių nušlifavus smėliasrove arba padengus laku įmanoma padidinti paviršiaus glotnumą atitinkamai ne mažiau nei 1,2 ir 3 kartus.

6. Mažesnėmis nei 20 μm skersmens smulkiadispersėmis kietosiomis lignino dalelėmis užteršto dujų srauto, praleidus 150 000 m³ agresyviųjų dujų, esant 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklone, valymo efektyvumas siekia iki 88,2 %. Kai vidutinis dujų srauto greitis yra 12 m/s, statinis slėgis prieš ir po patobulinto daugiakanalio ciklono yra lygus atitinkamai 735 Pa ir 510 Pa. Tai sudaro 225 Pa aerodinaminį pasipriešinimą, kuris ne mažiau 20 % mažesnis nei tradicinio daugiakanalio ciklono.

7. Atliktais patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimais įrodyta, kad pasiektas vidutinis smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo iš agresyviųjų dujų efektyvumas siekia iki 86 %. Nors nustatyta, kad patobulinto daugiakanalio ciklono valymo efektyvumas yra 2–4 % mažesnis nei daugiakanalio ciklono, tačiau taikant patobulintą bandomąjį cikloną galima išvalyti iki 150 000 m³ agresyviųjų dujų nesant reikšmingam valymo įrenginio užsikimšimui.

8. Atlikus daugiakanalio ciklono smulkiadispersių kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad didėjant bendrai kietųjų dalelių koncentracijai, valymo efektyvumas taip pat didėja. Pastebimai efektyvumas didėja esant virš 800 mg/Nm³ kietųjų dalelių koncentracijai, tuomet

2,5 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas padidėja nuo 43,5 iki 50,5 %. Šalinimo efektyvumo didėjimo tendencija išlieka ir kitų frakcijų kietosioms dalelėms.

9. Remiantis skaitinio modeliavimo rezultatais, naudojant ANSYS programinio paketo *Fluent* paprogramį ir taikant skirtingo detalumo skaičiavimo tinklius, buvo nustatyta, kad mažiausios modelių kintamųjų paklaidos yra gautos kai taikomos $k-\epsilon$ ir $k-\omega$ klampos modelių modifikacijos. Tikslumui pasiekti buvo sudarytas objekto skaitmeninis modelis, kurio elementų skaičius siekia $9,92 \cdot 10^6$ vnt., išplėstas iki 8 lygių pasienio sluoksnių bei nustatyti optimalūs modelio parametrai. Skaitiniu modeliavimu nustatytos agresyviųjų dujų srauto greičio vertės skiriasi ne daugiau nei 12,8 %, lyginant su vertėmis gautomis eksperimentiniais tyrimais.

10. Nustatyta, kad modeliavimo būdu gautos kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo vertės skiriasi nuo eksperimentinių tuo mažiau, kuo kietųjų dalelių skersmuo yra didesnis. 2,5 μm ir 10 μm skersmens kietųjų dalelių šalinimo efektyvumas patobulintame daugiakanaliame cikle atitinkamai siekė 71,9 % ir 41,3 %, o virš 70 μm skersmens sugaudomos sąlyginai visos dalelės. Gautų rezultatų skirtumas, lyginant su eksperimentiniais tyrimais nesiekia 15 %, ir lygus 11,8 %.

11. Atlikus teorinius, eksperimentinius ir skaitinio modeliavimo patobulinto daugiakanalio ciklono tyrimus nustatyta, kad gauti tyrimų rezultatai yra reprezentatyvūs ir patikimi: vidutinis agresyviųjų dujų srauto greitis pirmojo kanalo pradžioje siekia 11,9 m/s; bendras valymo efektyvumas siekia iki 84,5 %. Skirtumai tarp gautų tyrimais verčių neviršija 10 %.

12. Remiantis atliktų teorinių, eksperimentinių tyrimų bei skaitinio modeliavimo rezultatais nustatyta, kad pritaikius konstrukcinius sprendimus, parinkus tinkamą įrenginio elementų apdorojimą bei nustačius optimalius aerodinaminius parametrus valymo įrenginio sistemai eksploatuoti yra pasiektas tikslas efektyviai, išvengiant adhezijos šalinti smulkiadisperses kietąsias daleles iš agresyviųjų dujų.

Rekomendacija

Sukurtas patobulintas pramoninis bandomasis daugiakanalis ciklonas smulkia-dispersėms kietosioms dalelėms iš agresyviųjų dujų srauto pašalinti. Lignino, medienos ir medienos pelenų kietųjų dalelių emisijos susidaro biokuro deginimo metu, įvairių mechaninio apdorojimo arba džiovinimo procesų metu. Pritaikyti konstrukciniai elementai: ketvirtadalio žiedo formos elementai, juose išpjautos angos ir atlenktos 5° kampu plokštelės, parinktas optimalus 0,03 m pločio išorinis ištisinis žiedinis plyšis ir 0,005 m vidiniai kanalų segmentiniai žiediniai persidengiantys plyšiai. Vidinės konstrukcijos glotnumo padidinimui siūloma vidinius elementų paviršius gaminti iš nerūdijančio plieno, kai paviršiaus vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis siekia $0,273 \mu\text{m}$. Siūloma, kad kreivalinijinais elementais suformuotuose kanaluose būtų sudaromas 50 / 50 % periferinio ir tranzitinio dujų srautų pasiskirstymas. Tokiu atveju yra pasiekiamas didžiausias – iki 88,2 % – valymo efektyvumas šalinant mažesnes nei $20 \mu\text{m}$ smulkiadisperses kietąsias daleles. Esant optimaliam 12 m/s vidutiniam dujų srauto greičiui ciklono kanaluose, įrenginio našumas pasiekia iki $1300 \text{ m}^3/\text{val.}$, o ciklono pasipriešinimas siekia 225 Pa.

Literatūros sąrašas

Ališauskas, T., Viselga, G. ir Jasinskas, A. (2012). Biomasės deginimo tyrimai Vaidotų katilinėje. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(6), 519–522.

Altmeyer, S., Mathieu, V., Jullemier, S., Contal, P., Midoux, N., Rode, S. & Leclers, J. P. (2004). Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software. *Chem. Eng. Prog.*, 43, 511–522.

Ambrulevičius, R. (2010). Biomasės deginimas mažos bei vidutinės galios katilinėse ir emisijų problemos. *Energetika*, 56(2), 103–109.

Anslys. (2017). *Support and documentation for customer*. Release 18.0. SAS IP.

Aplinkos apsaugos agentūra. (2019). Oro kokybės ataskaitos. Prieiga per internetą: <http://oras.gamta.lt/cms/index?rubricId=d20b1c7f-77df-4f26-8c9d-2f198e02aa02>

Avci, A. and Karagoz, I. (2003). Effect of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Journal of Aerosol Science*, 34, 937–955.

Baltrenas, P.; Pranskevicius, M. & Venslovas, A. (2015). Optimization of the new generation multichannel cyclone cleaning efficiency. *Energy Procedia*, 72, 188–195.

Baltrėnas, P., Vaitiekūnas, P., Jakštonienė, I. & Konoverskytė, S. (2012). Study of gas–solid flow in a multichannel cyclone. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 20(2), 129–137.

Baltrėnas, P., Vaitiekūnas, P., Sigal, A., Serebryanskyy, D. ir Jakštonienė, I. (2011). Daugiakanalis ciklonas (cilindrinis korpusas). LR Valstybinis patentų biuras. Nr. LT 5912, B04C. Lietuva.

- Baltrėnas, P. and Morkūnienė, J. (2006). Investigation of particulate matter concentration in the air of Žvėrynas district in Vilnius. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 14(1), 23–30.
- Bateman, A. P., Belassein, H. & Martin, S. T. (2014). Impactor Apparatus for the Study of Particle Rebound: Relative Humidity and Capillary Forces. *Aerosol Science and Technology*, 48(1), 42–52.
- Beek, M. C., Rindt, C. C. M., Wijers, J. G. & Steenhoven, A. A. (2006). Rebound characteristics for 50-µm particles impacting a powdery deposit. *Powder Technology*, 165, 53–64.
- Bemer, D., Regnier, R., Morele, Y., Gripari, F., Appertcollin, J. & Thomas, D. (2013). Study of clogging and cleaning cycles of a pleated cartridge filter used in a thermal spraying process to filter ultrafine particles. *Powder Technology*, 234, 1–6.
- Bernardo, S., Mori, M., Peres, A. P. & Dionisio, R. P. (2006). 3-D Computational fluid Dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles. *Powder Technology*, 162, 190–200.
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Bacchus, H., Bernstein, I. L., Fritz, P., Horner, E., Li, N., Mason, S., Nel, A., Oullette, J., Reijula, K., Reponen, T., Seltzer, J., Smith, A. & Tarlo, S. M. (2008). The health effects of nonindustrial indoor air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121, 585–591.
- Biodos. (2019). Water treatment system. Prieiga per internetą: <http://www.biodos.org/>
- Baltijos biomasės tinklas. (2007). *Kauno apskrities biomasės energetikos strategija*. Prieiga per internetą: https://issuu.com/kreal23/docs/kauno_aps._bioen_strtg
- Zenas, B., Harte, W. H. & Walsh, J. F. (1961). *Flour milling process*. Patent US 3,001,727. United State of America.
- Boyko, T., Skladanyy, D., Abramova, A., Plashykhin, S. & Semenyuk, N. (2016). Analysis of the efficiency of purification of gas flow in a centrifugal filter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10), 4–9.
- Boskovic, L., Altman, I. S., Agranovski, I. E., Braddock, R. D., Myojo, T. & Choi, M. (2005). Influence of Particle Shape on Filtration Processes. *Aerosol Science and Technology*, 39(12), 1184–1190.
- Braz, J. (2004). A new role for reduction in pressure drop in cyclones using computational fluid dynamics techniques. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21(1), 10–14.
- Caliskan, M. E., Karagoz, I., Avci, A. & Surmen, A. (2019). An experimental investigation into the particle classification capability of a novel cyclone separator. *Separation and Purification Technology*, 209, 908–913.
- Calle, S., Contal, P., Thomas, D., Bemer, D. & Leclerc, D. (2002). Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. *Powder Technology*, 128, 213–217.
- Canpolat, B. R., Atimtay, A. T., Munlafalioglu, I., Kalafatoglu, E. & Ekinici, E. (2002). Emission factors of cement industry in Turkey. *Water, air and soil pollution*, 138, 235–252.

- Care, I., Bonthoux, F. & Fontaine, J.-R. (2014). Measurement of air flow in duct by velocity measurements. *EPJ Web of Conferences*, 77, 1–5.
- Chen, Q. and Hildemann, L. (2009). The effects of human activities on exposure to particulate matter and bioaerosols in residential homes. *Environmental Science & Technology*, 43, 4641–4646.
- Chen, S. and Chen, D.-R. (2016). Numerical Study of Reverse Multi-Pulsing Jet Cleaning for Pleated Cartridge Filters. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1991–2002.
- Christiansen, B., Sveberg, K., Hjelkrem, I. & Kvamsdal, D. (2005). *Axial demisting cyclone*. Patent US 2005/0000200 A1. Norway.
- Cilas 1090. *Documentation of particle size and shape analysis*. 2016. France.
- Cortés, C. and Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Energy and Combustion Science*, 33(5), 409–452.
- Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M. & Tsuji, Y. (2012). *Multiphase Flows with Droplet and Particles*. Second ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.
- Dejaguin, B. V., Miiller, V. M. & Toporov, Y. P. (1975). Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 53(2), 314–325.
- Derksen, J. J. (2003). Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone. *AIChE Journal*, 49, 1359–1371.
- Derksen, J. J., Sundaresan, S. & van den Akker, H. E. A. (2006). Simulation of mass loading effects in gas–solid cyclone separators. *Power Technology*, 163, 59–68.
- Dong, S., Yang, C., Ou, B., Lu, H. & Cheng, X. (2018). Experimental investigation on the effects of nozzle-hole number on combustion and emission characteristics of ethanol/diesel dual-fuel engine. *Fuel*, 217, 1–10.
- EAA signalai. Svarbiausios Europos aplinkos problemos. (2019). Prieiga per internetą: <https://www.eea.europa.eu/lt/signalai/signalai-2018>
- Ehrlich, C., Ehrlich, G., Noll, W., Kalkoff, G., Baumbach, A. & Dreiseidler. (2007). PM10, PM2.5 and PM1.0 emissions from industrial plants. Results from measurement programmes in Germany. *Atmospheric Environment*, 41, 6236–6254.
- Elsayed, K. (2011). *Analysis and Optimization of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies*. Summary of doctoral dissertation. Brussel: Uitgeverij University Press.
- Europos komisija. (2019). ES aplinkos politika. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/info/departments/environment_lt
- European Union Law. (2019). Direktyva „Dėl aplinkos oro kokybės ir švaresnio oro Europoje“ (Direktyva 2008/50/EB). Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050>
- Europos sąjungos leidinių biuras. (2019). Prieiga per internetą: <https://publications.europa.eu/lt/publication-detail/-/publication/>
- Evald, A. (2014). *Agricultural biomass – experiences from Denmark*. Prieiga per internetą: http://orbit.dtu.dk/files/97912187/Experiences_with_biomass_in_Denmark.pdf

- Fazilat, H., Ghatarband, M., Mazinani, S., Asadi, Z. A., Shiri, M. E. & Kalaei, M. R. (2012). Predicting the mechanical properties of glass fiber reinforced polymers via artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Computational Materials Science*, 58, 31–37.
- Fletcher, R., Briggs, N., Ferguson, E. & Gillen, G. (2008). Measurements of Air Jet Removal Efficiencies of Spherical Particles from Cloth and Planar Surfaces. *Aerosol Science and Technology*, 42(12), 1052–1061.
- Goncalves, E. and Zeidan, D. (2017). Numerical study of turbulent cavitating flows in thermal regime. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 27(7), 1487–1503.
- Gong, A. L. and Wang, L. Z. (2004). Numerical study of gas phase flow in cyclones with the repds. *Aerosol Technology*, 38, 506–512.
- Gopani, N. and Bhargava, A. (2011). Design of High Efficiency Cyclone for Tiny Cement Industry. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2(5), 350–354.
- Guarnieri, M. and Balmes, J. R. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383(9928), 1581–1592.
- Guo, Y., Zhang, J., Zhao, Y., Wang, S., Jiang, C. & Zheng, C. (2017). Chemical agglomeration of fine particles in coal combustion flue gas: Experimental evaluation. *Fuel*, 203, 557–569.
- Gujun, W., Guogang, S., Xiaohu, X. & Mingxian, S. (2008). Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*, 183, 94–104.
- Handbook of portable measurement of raying for TR200 tester. *Qualitest*. 2016. 2 p.
- Heumann, W. (2013). *Cyclone separator arrangement*. Patent US 8,512,451 B1. United State of America.
- Hideto, Y., Kouichiro, O. & Kunihiro, F. (2004). The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones. *Powder Technology*, 149, 139 – 147.
- Hyunhee, P., Jang, J. K. & Shin, J. A. (2011). Quantitative Exposure Assessment of Various Chemical Substances in a Wafer Fabrication Industry Facility. *Saf. Health Work*, 2, 39–47.
- Hoffmann, A. C. and Stein, L. E. (2008). *Gas cyclones and swirl tubes. Principles, Design and Operation*. Berlin: Springer.
- Holbrow, P. (2013). Dust explosion venting of small vessels and flameless venting. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(3), 183–190.
- Hong, C., Kim, B., Kwon, K. & Park, C. (2012). The effect of cyclone shape and dust collector on gas – solid flow and performance. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 252–257.
- Hu, L. Y., Zhou, L. X., Zhang, J. & Shi, M. X. (2005). Studies on strongly swirling flows in the full space of volute cyclone separator. *AIChE Journal*, 51(3), 740–749.

Hu, S., Firth, B., Vince, A. & Lees, G. (2001). Prediction of dense medium cyclone performance from large size density tracer test. *Minerals Engineering*, 14, 741–751.

Ibrahim, T. H., Burk, T. R., Etzler, F. M. & Neuman, R. D. (2000). Direct adhesion measurements of pharmaceutical particles to gelatin capsule surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(10), 1225–1242.

International organization for standartization. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates – Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators for the assessment of abrasive blast-cleaned surfaces. ISO 8503–1:2012. 8 p.

International organization for standartization. Stationary source emissions -- Manual determination of mass concentration of particulate matter. ISO 9096:2017.

Yan, C., Liu, G. & Chen, H. (2013). Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning. *Powder Technology*, 249, 424–430.

Jain, S. and Petrucci, G. A. (2015). A New Method to Measure Aerosol Particle Bounce using a cascade electrical low pressure impactor. *Aerosol Science and Technology*, 49(6), 390–399.

Jayarathne, T., Stockwell, C. E., Yokelson, R. J., Nakao, S. & Stone, E. A. (2014). Emissions of Fine Particle Fluoride from Biomass Burning. *Environmental Science and Technology*, 48, 12636–12644.

Jakštonienė, I. (2012). *Researches and development of cylindrical multichannel cyclone with adjustable half-rings*. Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika.

Jakštonienė, I., Serebryanskyy, D. & Vaitiekūnas, P. (2011). Experimental research on the work of centrifugal filter when eliminating solid particles from clinker cooling system. The 8th International conference „Environmental engineering“: selected papers, May 19–20, 2011. Vilnius: Technika, 1, 134–138.

Jakštonienė, I. ir Vaitiekūnas, P. (2010). Dujų turbulencijos ciklone modeliavimas. „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2(5), 17–22.

Jakštonienė, S. ir Vaitiekūnas, P. (2009). Skaičiuojamosios fluidų dinamikos modeliavimo taikymas kūginiam grįžtamojo srauto cikonui tirti. „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 1(4), 51–55.

Jasevičius, R., Baltrėnas, P., Kačianauskas, R. & Grubliauskas, R. (2014). DEM simulation of the impact of ultrafine class particles on the partition wall of the multichannel cyclone. *Particulate science and technology*, 32(6), 576–587.

Jasevičius, R., Tomas, J. & Kačianauskas, R. (2011). Simulation of normal impact of ultra-fine silica particle on substrate. *Particulate Science and Technology*, 29, 107–126.

Jasevičius, R., Tomas, J., Kačianauskas, R. & Zabulionis, D. (2014). Simulation of Adhesive Dissipative Behavior of a Microparticle Under the Oblique Impact. *Particulate Science and Technology*, 32, 486–497.

Jia, M., Wang, D., Yan, C., Song, J., Han, Q., Chen, F. & Wei, Y. (2019). Analysis of the pressure fluctuation in the flow field of a large-scale cyclone separator, *Powder Technology*, 343, 49–57.

- Jia, Y. and Lighty, J. A. S. (2012). Ash Particulate Formation from Pulverized Coal under Oxy-Fuel Combustion Conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (9), 5214–5221.
- John, W. and Reischl, G. (2012). A Cyclone for Size-Selective Sampling of Ambient Air. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30(8), 872–876.
- Kaya, F. and Karagoz, I. (2008). Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones. *Current Science*, 94(10), 1273–1278.
- Kalman system. (2019). Prieiga per internetą: <http://kalmansystem.hu/home-en/>
- Kavaliauskas, A. and Vaitiekūnas, P. (2001). Modelling of Reynolds stresses in overflowing air stream in a square channel. *Energetika*, 3, 38–43.
- Kim, H., Jeon, S., Song, M. & Kim, K. (2014). Numerical Simulations of Water Droplet Dynamics in Hydrogen Fuel Cell Gas Channel. *Journal of Power Sources*, 246, 679–695.
- Kim, J. Y., Gao, S., Yermakov, M., Elmashae, Y., He, X., Reponen, T. & Grinshpun, S. A. (2016). Performance of Electret Filters for Use in a Heating, Ventilation and Air Conditioning System and an Automotive Cabin against Combustion and NaCl Particles. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 1523–1531.
- Kim, K.-H., Kabir, E. & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143.
- Kuuluvainen, H., Saari, S., Mensah-Attipoe, J., Arffman, A., Pasanen, P., Reponen, T. & Keskinen, J. (2016). Triboelectric charging of fungal spores during resuspension and rebound. *Aerosol Science and Technology*, 50(2), 187–197.
- Lars H., Farshchi, M., Morgeneyer, M., Schwedes, J., Butt, H-J. & Kappl, M. (2005). Adhesion of carbonyl iron powder particles studied by atomic force microscopy. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(3–5), 199–213.
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 86, 225–233.
- Lee, J.-T. and Huang, C.-H. (2012). Analysis of Cyclone Dust Collector Air Flow. *Advances in Biomedical Engineering*, 6, 99–106.
- Li, J. and Zhou, Y. (2015). Occupational Hazards Control of Hazardous Substances in Clean Room of Semiconductor Manufacturing Plant Using CFD Analysis. *Toxicol. Ind. Health*, 32, 123–139.
- Li, Z., Zhang, H., Bailey, S. C. C., Hoagg, J. B. & Martin, A. (2017). A data-driven adaptive Reynolds-averaged Navier–Stokes $k-\omega$ model for turbulent flow. *Journal of Computational Physics*, 345, 111–131.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2019a). 2007 m. birželio 11 d. įsakymą Nr. D1-329/V-469 „Dėl teršalų, kurių kiekis aplinkos ore vertinamas pagal Europos Sąjungos kriterijus, sąrašo patvirtinimo ir ribinių aplinkos oro užterštumo verčių nustatymo“. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.113899>
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2019b). 2013 m. balandžio 10 d. įsakymas Nr. D1-244 „Dėl išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normų LAND 43 – 2013“. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.446368>

- Lietuvos Respublikos statistikos departamentas. (2019). Prieiga per internetą: <https://www.stat.gov.lt>
- Matuliuskaitė, A. (2009). Oro tarša kietosiomis dalelėmis, jos įtaka gyvenimo kokybei ir taršos mažinimo patalpose priemonės. „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. *Aplinkos apsaugos inžinerija*, 1(5), 114–117.
- Mencher, Y. and Fichman, M. (1998). *Cyclone separator*. Patent WO 98/52673. B01D 45/12. Israel.
- Menter, F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
- Menter, F. R. (2009). Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23(4), 305–316.
- Montazeri, H., Blockena, B. & Hensena, L. M. J. (2015). Evaporative Cooling by Water Spray Systems: CFD Simulation, Experimental Validation and Sensitivity Analysis. *Building and Environment*, 83, 129–141.
- Morkūnienė, J. (2006). *Vilniaus miesto rajonų kietųjų dalelių koncentracijos ore nustatymas ir įvertinimas*. Vilnius.
- Nadzeikienė, J. (2012). *Aplinkos apsaugos inžinerija*. Kaunas: Akademija.
- Naik, B., Khatua, K. K., Wright, N., Sleigh, A. & Singh, P. (2018). Numerical modeling of converging compound channel flow. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24(3), 285–297.
- Nazaroff, W. W. and Weschler, C. (2004). Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants. *Atmospheric Environment*, 38, 2841–2865.
- Noh, S.-Y., Heo, J.-E., Woo, S.-H., Kim, S.-J., Ock, M.-H., Kim, Y.-J. & Yook, S.-J. (2018). Performance improvement of a cyclone separator using multiple subsidiary cyclones. *Powder Technology*, 338, 145–152.
- Nussbaumer, T. (2003). Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. *Energy & Fuels*, 17, 1510–1521.
- Oh, J. K., Han, J. G. & Kim, T.-S. (2009). *A multi cyclone dust collector for a vacuum cleaner*. European Patent EP 1 774 890 B1. China.
- Ozarovskis, D. (2012). *The research of acoustic cyclone*. Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika.
- Pagano, P., de Zaiacomio, T., Scarcella E., Bruni, S. & Calamosca, M. (1998). Mutagenic activity of total and particle sized fraction of urban particulate matter. *Environmental Science and Technology*, 30, 3512–3516.
- Particulate Matter. (2019). U. S. Environmental Protection Agency. Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/pm-pollution>
- Patat, F. and Schmid, W. (1960). Adhesion and nitrogen research. *Chem. Ing. Techn.*, 32(1), 8–16.

- Petraitis, E. ir Vasarevičius, S. (2001). *Kietųjų dalelių sklaidos atmosferoje skaitinis modeliavimas taikant "Varsa" ir "Phoenix" programas*. Aplinkos inžinerija, T. IX, Nr. 1, 23–28.
- Portet-Koltalo, F., Preterre, D. & Dionnet, F. (2011). A New Analytical Methodology for a Fast Evaluation of Semi-volatile Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Vapor Phase Downstream of a Diesel Engine Particulate Filter. *J. Chromatogr. A*, 1218, 981–989.
- Posner, L. N. and Pandis, S. N. (2015). Sources of ultrafine particles in the Eastern United States. *Atmospheric Environment*, 111, 103–112.
- Raoufi, A., Shams, M. & Kanani, H. (2009). CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*, 191, 349–357.
- Redigolo M. (2017). *Standart operating procedure: Jeol Jsm 7600F scanning electron microscope*. West Virginia University.
- Riaza, J., Gibbins, J. & Chalmers, H. (2017). Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*, 202, 650–655.
- Roloff, C., Lukas, E., van Wachem, B. & Thevenin, D. (2019). Particle dynamics investigation by means of shadow imaging inside an air separator. *Chemical Engineering Science*, 195, 312–324.
- Schaik, W., Grooten, M., Wernaart, T. & Geld, C. (2010). High Accuracy Acoustic Relative Humidity Measurement in Duct Flow with Air. *Sensors*, 10(8), 7421–7433.
- Shanthanu, S., Raghuram, S. & Raghavan, V. (2013). Transient Evaporation of Moving Water Droplets in Steam–hydrogen–air Environment. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 64, 536–546.
- Shi, B., Ekberg, L. E. & Langer, S. (2013). Intermediate air filters for general ventilation applications: An experimental evaluation of various filtration efficiency expressions. *Aerosol Sci. Technol.*, 47, 488–498.
- Shi, D., Huang, Y., Wang, H., Yuan, W. & Fu, P. (2019). Deoiling of oil-coated catalyst using high-speed suspending self-rotation in cyclone. *Separation and Purification Technology*, 210, 117–124.
- Shi, L. M. and Bayless, D. J. (2007). Comparison of boundary conditions for predicting the collection efficiency of cyclones. *Powder Technology*, 173, 29–37.
- Sobolev, A. A., Melnikov, P. A. & Tiutiunnyk, A. O. (2011). The movement of particles in the air stream. *Mechanical Engineering*, 3(17), 82–86.
- Sommerfeld, M. and Ho, C. H. (2003). Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows. *Powder Technology*, 131, 1–6.
- Song, J., Zhang, Y., Zhu, D. & Xiang, R. (2019). Performance evaluation of virtual cyclone with various inlet and outlet dimensions. *Journal of Aerosol Science*, 128, 114–124.
- Sorrentino, G., Sabia, P., Joannon, M., Bozza, P. & Ragucci, R. (2018). Influence of pre-heating and thermal power on cyclonic burner characteristics under mild combustion. *Fuel*, 233, 207–214.

- The Humidity/Moisture handbook. (2011). Machine Applications Corporation. Ohio. Prieiga per internetą: <https://www.macinstruments.com>
- United States Environmental Protection Agency. (2019). Criteria Pollutant: Particulate Matter. Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- Utikar, R., Darmawan, N., Tade, M., Li, Q., Evans, G., Glenn, M. & Pareek, V. (2010). *Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators*. Computational Fluid Dynamics, Hyoung Woo Oh (Ed.). InTech.
- Vaitiekūnas, P. 2011. *Koncentracijos, šilumos ir masės (triukšmo) pernašos procesų modeliavimo programos. Duomenų bankas*. Vilnius: Technika.
- Vaitiekūnas, P. and Banaitytė, R. (2007). Modeling of motor transport exhaust dispersoin. *Journal of enviromental engineering and landscape management*, 15(1), 39–46.
- Vaitiekūnas, P. and Jakštonienė, I. (2010). Analysis of numerical modeling of turbulence in a conical reverse-flow cyclone. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(4), 321–328.
- Vamvuka, D., Trikouvertis, M., Pentari, D., Alevizos, G. & Stratakis, A. (2017). Characterization and evaluation of fly and bottom ashes from combustion of residues from vineyards and processing industry. *Journal of the Energy Institute*, 90(4), 574–587.
- Van Wachem, B. G. M. & Almstedt, A. E. (2003). Methods for Multiphase Computational Fluid Dynamics, *Chemical Engineering Journal*, 96(1), 81–98.
- Vekteris, V., Striška, V., Mokšin, V. & Ozarovskis, D. (2011a). Adhesion of particles in secondary air flow. In *15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, 15(1), (369–372). Prague.
- Vekteris, V., Striška, V., Mokšin, V. & Ozarovskis, D. (2011b). Study of the interaction between particles in the acoustic cyclone separator. *Ultragarsas*, 66(1), 49–53.
- Vekteris, V., Striška, V., Mokšin, V., Ozarovskis, D. & Zaremba, R. (2012). Tribological adhesion of particles in acoustic field. *Journal of vibroengineering*, 14(2), 509–513.
- Venckus, Ž., Venslovas, A. & Pranskevičius, M. (2014). Experimental research into aerodynamic parameters of a cylindrical one-level 8-channel cyclone. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 22(4), 284–291.
- Wada, M., Tsukada, M., Kondo, A., Kogure, N., Lenggono, W., Szymanski, W. W., Naito, M., Kanaoka, C. & Kamiya, H. (2009). Separation Characteristics of a Multistage VIS Impactor for PM10/PM2.5 Mass Concentration Measurement in a Stack of a Stationary Source. *Journal of the Society of Powder Technology*, 46, 467–475.
- Wallace, J. M. and Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press.
- Wang, B., Xu, D. L., Chu, K. W. & Yu, A. B. (2006). Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. *AppliedMathematical Modelling*, 30, 1326–1342.
- Wang, S., Li, H., Wang, R., Wang, X., Tian, R. & Sun, Q. (2019). Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM. *Advanced Powder Technology*, 30(2), 227–239.

- Wang, Y., Yang, Y., Zou, Y., Cao, Y., Ren, X. & Li, Y. (2016). Evaporation and Movement of Fine Water Droplets Influenced by Initial Diameter and Relative Humidity. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 301–313.
- Wasilewski, M. and Brar, L. S. (2019). Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*, 213, 19–33.
- Wilkinson, A. J. and Britton, T. B. (2012). Strains, planes, and EBSD in materials science. *Materialstoday*, 15(9), 366–376.
- Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the k- ω Turbulence Model Revisited. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 46(11), 2823–2838.
- Winfield, D., Cross, M., Croft, N., Paddison, D. & Craig, I. (2013). Performance comparison of a single and triple tangential inlet gas separation cyclone: a cfd study. *Powder Technology*, 235, 520–531.
- World Health Organisation. (2019). Prieiga per internetą: <https://www.who.int/>
- Xie, J., Dong, M. & Li, S. (2016). Dynamic impact model of plastic deformation between micro-particles and flat surfaces without adhesion. *Aerosol Science and Technology*, 50(4), 321–330.
- Xie, J., Dong, M., Li, S., Shang, Y. & Fu, Z. (2017). Dynamic characteristics for the normal impact process of micro-particles with a flat surface. *Aerosol Science and Technology*, 52(2), 222–233.
- Xiong, Z., Zhongli, J. & Wu, X. (2014). Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones. *Powder Technology*, 260, 644–649.
- Xu, Y., Liu, X., Cui, J., Chen, D., Xu, M., Pan, S., Zhang, K. & Gao, X. (2016). Field Measurements on the Emission and Removal of PM_{2.5} from Coal-Fired Power Stations: 4. PM Removal Performance of Wet Electrostatic Precipitators. *Energy Fuels*, 30(9), 7465–7473.
- Xu, J., Zhang, M., Shao, L. & Kang, J. (2016). Subjective evaluation of the environmental quality in China's industrial corridors. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 24(1), 21–36.
- Zagorskis, A. (2009). *Research and design of low capacity air treatment biofilters*. Summary of doctoral dissertation. Vilnius: Technika.
- Zhang, G., Chen, G. & Yan, X. (2018). Evaluation and improvement of particle collection efficiency and pressure drop of cyclones by redistribution of dustbins. *Chemical Engineering Research and Design*, 139, 52–61.
- Zhang, J., Long, Z., Liu, W. & Chen, Q. (2016). Strategy for Studying Ventilation Performance in Factories. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 442–452.
- Zhao, B., Su, Y. & Zhang, J. (2006). Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with configurational single and spiral double inlet configuration. *Trans IChemE. Chemical Engineering Research and Design*, 84, 1158–1165.

Zhou, Z., Wang, G., Chen, B., Guo, L. & Wang, Y. (2013). Evaluation of Evaporation Models for Single Moving Droplet with a High Evaporation Rate. *Powder Technology*, 240, 95–102.

Zhu, H., Hua, F., Kang, Y. & Chen, Y. (2017). Numerical analysis of the dynamics of aerosol inertial collection and aggregation on raindrops. *Aerosol Science and Technology*, 52(3), 253–268.

Zhu, X., Liao, Q., Sui, P. C. & Djilali, N. (2010). Numerical Investigation of Water Drop-let Dynamics in a Lowtemperature Fuel Cell Microchannel: Effect of Channel Geometry. *Journal of Power Sources*, 195, 801–812.

Zosima, A. T., Tsakanika, L.–A. V. & Ochsenkuhn–Petropoulou, M. T. (2017). Particulate matter emissions, and metals and toxic elements in airborne particulates emitted from bio-mass combustion: The importance of biomass type and combustion conditions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 52(6), 497–506.

Авраменко, М. И. (2010). *О k - ϵ модели турбулентности*. 2-ое изд., перераб. и дополн. Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ.

Андрианов, Е. И. (1981). *Методы определения прочностных реологических характеристик порошкообразных материалов*. Москва: Химия.

Балан, С. А., Буров А. И., Буров А. А. и Серебрянский Д. А. (2002). *Аппарат с замкнутыми контурами*. Сборник научных статей „Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов”. Харьков.

Балан, С. А., Буров А. А. и Буров, А. И. (2000). Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутыми контурами. *Научный и производственно-практический сборник*, 2(11), 56–59.

Бойко, Т. В., Абрамова, А. О., Серебрянский, Д. О. и Семенюк, М. В. (2015). До питания побудови математичної моделі одновимірного об'єкту. *Технологический аудит и резервы производства*, 2/5(22), 16–21.

Буров, А. А., Буров, А. И. и Гамолич, В. Я. (2007). Континуальная модель запыленного криволинейного течения газа. *Труды одесского политехнического университета*, 1(27), 235–237.

Буров, А. А., Буров, А. И., Силин, А. В. и Цабиев, О. Н. (2005). Центробежная очистка промышленных выбросов в атмосферу. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, 6, 44–51.

Буров, А. А., Карамушко, А. В. и Гамолич, В. Я. (2012). Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов “Сиот” и многоканальных пылеуловителей “Буран”. *Праці Одеського політехнічного університету*, 1(38), 271–275.

Ватин, Н. И. и Стрелец, К. И. (2003). *Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т.

Вдовенко, М. И., Баяхунов А. Я. и Чурсина, Н. Я. (1978). *Загрязнение и износ поверхностей нагрева парогенераторов*. Алма-ата: Наука.

Зимон, А. Д. (1976). *Адгезия пыли и порошков*. Москва: Химия.

- Зимон, А. Д. и Андрианов Е. И. (1978). *Аутогезия сыпучих материалов*. Москва: Металлургия.
- Лепихин, А. П., Деревянченко, И. В., Буров, А. А. и Серебрянский, Д. А. (2004). *Использование пылеуловителей новой конструкции вместо циклонов*. Наука, Техника, Производство. Москва: Издательство Металлург.
- Лешков, В. Г. (2007). *Разработка россыпных месторождений*. Горная книга. Москва: Издательство Московского государственного горного университета.
- Разва, А. и Беляев, И. (2011). Исследования сепарационных характеристик циклонного аппарата на связанных порошках. *Теплофизические основы энергетических технологий. Сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*, 230–233.
- Серебрянский, Д. А. (2004). *Повышение эффективности газоочистки тепловых энергетических установок. Диссертация*. Одесский национальный политехнический университет: Одесса.
- Серебрянский, Д. А. (2009). Центробежный фильтр пылеулавливания. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 6, 39–41.
- Серебрянский, Д. А. (2011). *Высокоэффективный центробежный фильтр для очистки газов*. Киев.
- Серебрянский, Д. А. и Новаковский Е. В. (2009). Очистка газов от пыли в центробежных фильтрах. *Промышленная теплотехника*, 31(3), 55–61.
- Тананаев, А. В. (1995). Инерционный фильтр-сепаратор. Патент РФ 2080939 от 26.01. Россия.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2015a). Experimental research on the dynamics of air flow parameters in a six-channel cyclone-separator. *Powder technology: an international journal of the science and technology of wet and dry particulate systems*, 283: 328–333 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=2,942 (2016).

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2015b). Investigation into the aerodynamic parameters of the recently designed two-level cylindrical multi-channel cyclone-separator. *Separation Science and Technology*. Philadelphia, USA: Taylor & Francis INC. ISSN 0149-6395. Vol. 50, no. 8: 1257–1269 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=1,106 (2016).

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2016a). Investigation into a new generation multi-channel cyclone used for removing lignin particulate matter from gas under conditions of an aggressive environment. *Process Safety and Environmental Protection*. Official journal of the European Federation of Chemical Engineering: Part B. ISSN 0957-5820. 99: 107–119 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=2,905 (2016).

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2016b). Numerical study of the aerodynamic parameters in a two-level multichannel cyclone. *Separation Science and Technology*. Philadelphia, USA: Taylor & Francis INC. ISSN 0149-6395. Vol. 51, no. 12: 2105–2113 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=1,106 (2016).

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2018). The investigation of the structure and operation of a multi-channel cyclone, separating fine solid particles from an aggressive dispersed gas and vapour flow. *Powder technology*. Amsterdam: Elsevier B.V. ISSN 0032–5910. Vol. 333: 327–338 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=2,942 (2016).

Baltrėnas, P.; Pranskevičius, M. & Chlebnikovas, A. (2014). Research on parameters changes in the two-level multichannel cyclone. *Environmental engineering and management journal*. Iasi: "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania. ISSN 1582-9596. Vol. 13, no. 9: 2135–2145 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=1,096 (2017).

Baltrėnas, P.; Vasarevičius, S.; Kazlauskienė, A. ir Chlebnikovas, A. (2014). Naujos kartos konstrukcijos vieno lygio daugiakanalio ciklono eksperimentiniai tyrimai. *Jaunųjų mokslininkų darbai = Journal of young scientists*. Šiauliai: Šiaulių universitetas. ISSN 1648-8776. 2014, Nr. 2(42): 139–145 (CEEOL; IndexCopernicus).

Chlebnikovas, A. ir Baltrėnas, P. (2012). Ciklonų su cilindrinio ir spiralinio korpusais eksperimentinių tyrimų analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 4, nr. 5: 479–486.

Chlebnikovas, A. ir Baltrėnas, P. (2015). Daugialygių daugiakanalių ciklonų aerodinaminių parametrų ir valymo efektyvumo eksperimentiniai tyrimai ir palyginimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 7, nr. 4: 372–379.

Chlebnikovas, A. ir Baltrėnas, P. (2016). Daugiakanalio ciklono panaudojimo dujų srauto dulkėtumo mažinimui agresyvioje aplinkoje teorinis vertinimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029–2341. T. 8, Nr. 4 (2016), p. 403–410.

Chlebnikovas, A. ir Baltrėnas, P. (2017). Specialaus ciklono su antriniais srautais aerodinaminių parametrų tyrimai. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija = Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 9, Nr. 4 (2017), p. 400–405.

Danilenkaitė, J.; Chlebnikovas, A. ir Vaitiekūnas, P. (2013). Daugiakanalio spiralinio ciklono oro greičių tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis: Aplinkos apsaugos inžinerija =*

Science – Future of Lithuania: Environmental protection engineering. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 5, Nr. 4: 349–355 (ICONDA; Gale®; Proquest).

Vaitiekūnas, P.; Petraitis, E.; Venslovas, A. & Chlebnikovas, A. (2014). Air stream velocity modelling in multichannel spiral cyclone separator. *Journal of environmental engineering and landscape management*. Vilnius: Technika. ISSN 1648-6897. Vol. 22, no. 3: 183–193 (Clarivate Analytics Web of Science). IF=0,635 (2016).

Straipsniai kituose leidiniuose

Chlebnikovas, A. and Baltrėnas, P. (2017a). Research and analysis of aggressive conditions formation into a multi channel cyclone. *Energy Procedia. International scientific conference "Environmental and Climate Technologies", CONECT 2016*, Riga, Latvia. Amsterdam: Elsevier Ltd.. ISSN 1876-6102. Vol. 113: 69–76.

Chlebnikovas, A. and Baltrėnas, P. (2017b). Researches of aggressive gas flow cleaning from wood ash particulate matter in the multi-channel cyclone // *10th International Conference "Environmental Engineering", April 27–28, 2017, Vilnius, Lithuania: selected papers*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-7092. 2017: 1–8.

Chlebnikovas, A. ir Baltrėnas, P. (2011). Oro srauto greičių pasiskirstymo šešiakanaliame ciklone eksperimentiniai tyrimai. *Aplinkos apsaugos inžinerija: 14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika. ISBN 978-9955-28-956-2. 1: 11–17.

Vaitiekūnas, P.; Petraitis, E. & Chlebnikovas, A. (2014). Cleaning efficiency researches in the cyclone with curved channels from different size particulate matter // *9th International Conference "Environmental Engineering", May 22–23, 2014, Vilnius, Lithuania: selected papers*. Vilnius: Technika. ISSN 2029–7092, ISBN 9786094576409. p. 1–9 (Index Copernicus).

Patentai

Baltrėnas, P. and Chlebnikovas, A. (2019). *Cylindrical Multi-Level Multi-Channel Cyclone-Filter*. Patent number: EP2886182. European Patent Office.

Baltrėnas, P. ir Chlebnikovas, A. (2013). *Daugialygis daugiakanalis cilindrinis ciklonas-filtr*. Nr. LT 6225 B. LR Valstybinis patentų biuras.

Baltrėnas, P. ir Chlebnikovas, A. (2017). *Daugiakanalis ciklonas-filtr* agresyvioms dujoms nuo kietųjų dalelių valyti. Nr. LT 6479 B. LR Valstybinis patentų biuras.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

Localized particulate pollutant emissions from gas (air) pollution sources are one of the most worrying contemporary environmental problems.

Emissions of fine-dispersed particulate matter (FDPM) are associated with the impact of road transport, large industrial emissions as well as the impact of heat generation equipment from private households on ambient air quality. The majority of FDPM is found in building materials, mining, metal and wood processing, metallurgy and food industry and energy production facilities – co-generation and thermal power plants, solid and liquid fuel boilers.

FDPM of less than 5 μm is highly harmful to human health as they are readily released into and accumulated in the lungs and respiratory tract. Prolonged exposure to respiratory dust results in respiratory damage, the compounds not only affects the lung tissue but also the entire human body, and can lead to pneumoconiosis and other diseases, cause eye and skin damage (Guarnieri and Balmes, 2014).

The aggressive gas flow (dusty or not) originates at the sites of pollution sources, during the processes of combustion, product processing (drying, insertion of chemical compounds). These processes could change the physical, chemical and mechanical properties of the emitted FDPM.

Purifying the air (gas) from the FDPM is very difficult because it requires complex cleaning equipment. Mostly use high-efficiency gas (air) purification facilities to remove

particulate matter (PM), among the most popular are electrostatic and sleeve-type filters. The operation of these types of filters is complex, their application possibilities are very limited. This is especially evident when collecting adhesive and wet FDPM purifying aggressive gas flow.

Relevance of the thesis

Traditional cyclones are effectively used for purifying dry dusty flows; however, their action is based on the separation of PM due to centrifugal forces, and thus they do not show extremely high gas treatment efficiency, especially when the gas flow is polluted with small-size pollutant PM (up to 20 μm in diameter).

There are data about application of multi-channel cyclones for purifying non-aggressive gas by catching particles larger than 1 μm . Their performance is based on the fact that the dusty gas flow passing through the channel system of the cyclone is purified by removing particulate matter under the action of centrifugal force and additionally by capturing a portion of the particles by filtration.

Researchers' teams carried out a lot of theoretical, experimental and modelling studies on multi-channel cyclones and published patents for inventions. However, the researches are limited to the number and arrangement of the existing curvilinear semi-rings in the device, whereas the internal device geometry is unchanged, the device's aerodynamic resistance during gas cleaning is rarely assess. Also, the above-mentioned research has been carried out under normal conditions, i.e. at low ambient humidity and temperature, without evaluating the influence of the chemical compounds on the purified gas flow.

Scientists from Lithuania (Vekteris, Striška, Mokšin et al., Vilnius Gediminas Technical University (VGTU)) experimentally investigated the interaction and adhesion of particles at the acoustic field in the cyclone, and Norwegian scientists (Christiansen et al., Oil and Gas Separation Technology NATCO Norway AS company research laboratory) designed and improved the cyclone with structural solutions to prevent the device from mist.

Multi-channel cyclones are more suitable to purify a gas (air) flow from sticky particles; however, under specific conditions (high temperature, high humidity, and presence of chemical compounds in the gas flow) clogging occurs, thus impeding the purifying process. Regeneration is complicated and lasting; therefore, operating under such conditions requires additional scientific assessment.

The object of research

Newly designed structure of a multi-channel cyclone with adapted primary and secondary gas inlets, configured curved elements, convex bottom of the separation chamber, exterior and interior slits inside it, and specially processed surfaces for removal of non-abrasive fine-dispersed particulate matter from aggressive gas.

The aim of the thesis

To create a gas (air) purifier capable of removal of fine-dispersed particulate matter (1–10 μm) from aggressive gas at temperature of 50–200 $^{\circ}\text{C}$, humidity above 95%, dusty flow contaminated with chemical pollutants, developing design improvements of multi-channel cyclone, taking into account the results of performed theoretical and experimental research and numerical modelling of the purification process.

The tasks of the thesis

The following objectives are required to achieve the set aim:

1. To theoretically analyze the physical parameters of aggressive gas flow in the newly designed multi-channel cyclone.
2. To experimentally research the aerodynamic parameters and their dependencies of aggressive gas flow in the newly designed multi-channel cyclone.
3. To experimentally research the overall removal efficiency of particulate matter and particular fractions ($\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}) in the newly designed multi-channel cyclone at aggressive gas flow conditions, as well as to evaluate adhesion of particles to internal surfaces of the cyclone in relation to the surface smoothness of design elements.
4. To evaluate the two-phase flow parameters and the motion trajectories of fine-dispersed particulate matter, and their impact on the capture efficiency performing numerical modelling.
5. To create and test a newly designed industrial pilot multi-channel cyclone for removal of fine-dispersed particulate matter from the aggressive gas flow.

The research methods

The current work involves the development of methods to research aggressive gas flow and separation of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . This includes the following steps: generation of the source; theoretical research to evaluate the properties of aggressive gas flow; selection of measurement points to research the gas flow velocity, volume of flow in the duct, and pressure; concentration of particles – calculated both as a total estimate and individually for fractions $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} – is determined using the cascade impactor, both based on the weight method; modelling of a single-phase and two-phase aggressive gas flow in the newly designed multi-channel cyclone are performed using ANSYS numerical simulation tool.

Scientific novelty of the thesis

The novelty of the work lies in the complexity of results of theoretical and experimental research of aggressive gas flow in the newly designed multi-channel cyclone using secondary gas inlets and adapted design solutions, modelling of ongoing aerodynamic and adhesion processes, development of the newly designed industrial pilot multi-channel cyclone for removal of fine-dispersed particulate matter from the aggressive gas flow, ensuring high purification efficiency and protection from cyclone clogging.

Practical value of the research findings

Research of the newly designed multi-channel cyclone will allow determining optimum parameters for removal of fine-dispersed particulate matter from the aggressive gas. Applying the device for cleaning of aggressive gas will eliminate the need for additional equipment to decontaminate the aggressive gas flow before using the main cleaning equipment. New design solutions will extend the operation time of the cleaning device as it will prevent the system from clogging. It will also reduce the emissions of particulate matter during purification of the aggressive gas flow.

Defended statements

1. As the gas flow temperature increases from 100 °C to 200 °C, the relative humidity decreases exponentially from 95% to 6.6% into the multi-channel cyclone.
2. A twofold increase of the gas flow velocity from 8 m/s to 16 m/s results in a threefold increase of aerodynamic resistance of the newly designed multi-channel cyclone (from 110 Pa to 335 Pa).
3. The efficiency of the newly designed multi-channel cyclone at removal of 10 µm and 2.5 µm particulate matter from the aggressive gas flow, respectively, is reduced about 2 times (from 81.3% to 50.5%).
4. According to the results of experimental research of aggressive gas flow velocity, the relative error of the $k-\omega$ turbulent viscosity model decreases 1.5 times (from 10.7% to 7.7%) as the volume of each cell of the calculation mesh of the newly designed multi-channel cyclone decreases 1.15 times (0.156 cm³ to 0.136 cm³).

Approval of the research findings

17 scientific articles have been published on the topic of the dissertation: seven – in scientific journals included in the Clarivate Analytics Web of Science list (Baltrėnas, Pranskevičius & Chlebnikovas, 2014; Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas & Chlebnikovas, 2014; Baltrėnas and Chlebnikovas, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2018); six – in peer-reviewed scientific journals referenced in other databases (Baltrėnas, Vasarevičius, Kazlauskienė & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2012, 2015, 2016, 2017; Danilenkaitė, Chlebnikovas & Vaitiekūnas, 2013); four – in conference proceedings (Chlebnikovas ir Baltrėnas, 2011; Vaitiekūnas, Petraitis & Chlebnikovas, 2014; Chlebnikovas and Baltrėnas, 2017a, 2017b). The European patent “Cylindrical multi-level multi-channel cyclone-filter” EP2886182 (Baltrėnas and Chlebnikovas, 2019) has been granted. The patent of the Republic of Lithuania “Cylindrical multi-level multi-channel cyclone-filter”, patent No. LT 6225B (Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2013) has been granted. Also, the patent of the Republic of Lithuania “Multi-channel cyclone-filter for cleaning aggressive gas from particulate matter”, patent No. LT 6479B (Baltrėnas ir Chlebnikovas, 2017) has been granted.

The results of the research discussed in the dissertation have been published in twelve scientific events:

- National conferences of scientists Science – Future of Lithuania 2016–2019, Vilnius;

- International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies Connect 2016, Riga, Latvia;
- International Scientific Conference on Environmental Engineering 2017, Vilnius;
- International scientific-practical conferences Human and Nature Safety 2017 and Human and Nature Safety 2018, 2017–2018, Kaunas;
- International 35th UIT Heat Transfer Conference 2017, Ancona, Italy;
- Country-wide conferences Heat Energy and Technologies 2018 and Heat Energy and Technologies 2019, 2018–2019, Kaunas;
- International PhD students Summer School 2016, Vilnius.

Science internships abroad: Internship at Marche Polytechnic University, Ancona, Italy, 2017 June–August.

The results of the research described in the dissertation were evaluated with the diploma of the laureate of competition Scientific Work of 2018 of Young Scientist and PhD student in Lithuanian Academy of Sciences, 2019, Vilnius.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of the introduction, three chapters, the general conclusion and recommendation, references and author's publications on the dissertation topic.

The volume of the dissertation is 214 pages, excluding appendices; 37 numbered equations, 51 figures and 8 tables were used in the text. 177 literature sources and 20 author publications were used when writing the dissertation.

1. Air pollution caused by fine-dispersed particulate matter, application analysis of multi-channel cyclone for gas cleaning and characteristic of aggressive gas flow

The section reviews the regularities of particulate matter formation and dispersion in the environment. The effect of particulate matter (PM) on human health and the environment is described. Processes in atmospheric air are dealt with emissions of contaminated particles in the flow. An overview of cyclones is presented and the principle of their operation is described, presented in a variety of industrial cyclones used. An overview of the next generation of multi-channel cyclones, their operation parameters and application possibilities are presented. Techniques for modelling gas flow in cyclones and software applications are described.

Purification of contaminated gas (air) flows in industry using cyclones is a complex heat and mass exchange process that has been researched for over 120 years by scientists (Nazaroff and Weschler, 2004; Ватин и Стрелец, 2003). In industrial processing, fine-dispersed particulate matter (FDPM) is emitted from a variety of raw materials and semi-finished products during the mechanical, thermal and chemical industrial processes. The latter is distinguished by drying processes in building and other materials (cement, clinker), in raw materials industry from mills, burners, as well as from aspiration systems

for pneumatic transport and the working environment, etc. (Bernstein et al., 2008; Gopani and Bhargava, 2011).

Emissions of particles, along with industrial, coke, smoke, those emitted from generators, etc., result from ongoing combustion processes (Nussbaumer, 2003; Vaitiekūnas and Banaitytė, 2007). Soot is formed and released as an incomplete combustion product of organic matter and fuel in the absence of sufficient oxygen. An aggressive gas flow can form using materials of different aggressiveness. A dusty aggressive gas flow of extremely high humidity and temperature is formed by various drying processes and by burning wet hard fuel. A doubled release of particulate matter and volatile compounds is also possible, e.g. by dried varnished surfaces.

Multi-channel cyclones with curvilinear channels forming closed loops, such as traditional hollow cyclones, are simple in design, their production process is not complicated because they are easy to install and operate. However, the main drawback lies in their limited application for dusty gas flow at high temperature and high humidity as high aerodynamic resistance is caused by high energy requirements.

In the most widely used multi-channel cyclones, the efficiency of gas treatment from FDPMP is determined by the interaction of FDPMP with surfaces limiting the gas flow. It is also influenced by the formation of particulate sediment layers on surfaces that change the movement of flow, thereby having an adverse effect on the particle deposition mechanism and resulting in reduced efficiency of purification (Разва и Беляев, 2011).

In numerical modelling, the default (automatic) function is used for the calculation mesh and for selecting the viscosity model and its variables. In addition to the proper details of the calculation mesh and the convergence of modelling results, the results of the numerical model most likely do not correlate with the physical model.

2. The methodologies of theoretical and experimental research of aggressive gas flow dynamic parameters and removal efficiency of fine-dispersed particulate matter in newly designed multi-channel cyclone

The newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets has been designed for purifying aggressive gas flow. It is characterized by a distinctive structure consisting of a separating chamber, within which curved quarter-ring-formed elements are arranged with the respective ratio of peripheral and transit flow distribution in the channels, primary and secondary dusty gas inlets, and not only the outer continuous ringed but also segmental ringed overlaid slits. The cylindrical elements in the separation chamber form four outer channels and the supposed inner central channel, so the cyclone can still be referred to as a four-channel cyclone (Fig. S2.1). The multi-channel cyclone with secondary gas inlets has been improved to adapt this cleaning device to the removal of FDPMP from an aggressive gas flow, i.e. at high temperature, high humidity and in the presence of certain chemical compounds.

The aim of the experimental research is to analyse the distribution of aggressive gas flow velocity in the channels of the newly designed multi-channel cyclone, to evaluate the

variation of aerodynamic resistance using structural solutions that reduce adhesion, to determine the removal efficiency of the FDPM of different types and properties from the aggressive gas flow, depending on the dynamic parameters of gas flow, and to investigate the particle adhesion phenomena and ways of reducing it inside the device.

The FDPM is separated in the separation chamber of the multi-channel cyclone not only by the centrifugal force resulting from the vortex flow but also by the filtration of the dust flow through the spaces between the curvilinear quarter-ring-formed elements. Thus, an additional filtration effect occurs, which results in increased removal efficiency of FDPM.

The experimental newly designed multi-channel cyclone stand (Fig. S2.1) was assembled in the laboratory of Environmental Technologies, Vilnius Gediminas Technical University. Theoretical studies have evaluated the variation of the working parameters of the newly designed multi-channel cyclone in the aggressive gas flow, as well as the changes in the characteristics of the gas flow aerodynamic parameters and the particle acting forces, based on the correlation of the characteristics. The main parameters characterizing the flow were calculated – dry and wet gas flow density, dynamic and kinematic viscosity, dew point, theoretically determined interdependencies of parameters. The mechanical forces, i.e. pressure, centrifugal – filtration, resistance, gravity and adhesion – filtration force, capillary and electrical force, aggressive gas stream Reynolds number were calculated in relation to the different particle size.

The most common examples of metal surfaces were selected for research of the surface smoothness: galvanized sheet (type S350GD + Z275 MA), stainless steel (type AISI 304 (EN 1.4306)) and black (standard) metal (type S235).

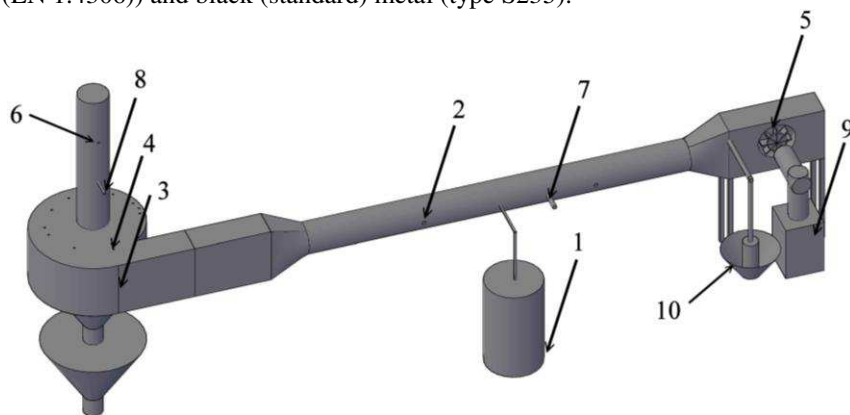


Fig. S2.1. Newly designed multi-channel cyclone experimental stand: 1 – autoclave; 2 and 6 – velocity measuring point in the duct in front of and behind the cyclone; 3 – velocity measuring point in the inlet into the cyclone; 4 – velocity measuring point in the separation chamber of multi-channel cyclone, in the channels; 5 – fan; 7 and 8 – pressure measuring point in front of and behind the cyclone; 9 and 10 – carbon monoxide and acetone simulation sources (source: author)

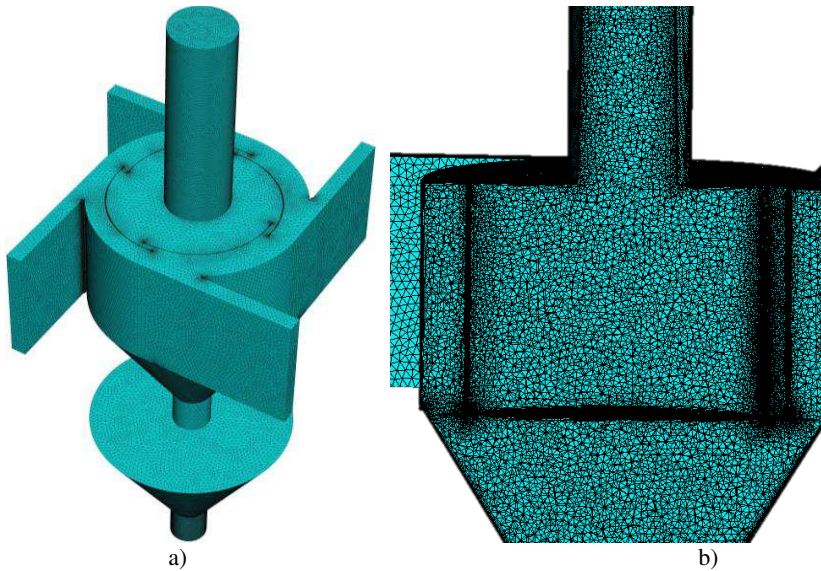


Fig. S2.2. Geometry and mesh of the newly designed multi-channel cyclone with secondary gas inlets: a) a main view of the mesh of object; b) inflated boundary layer of the convex bottom of separation chamber and the quarter-ring-formed elements (source: author)

The smoothness of the metals was determined by different treatment of their surface – comparative (untreated), sandblasting (Powerplus SBC 420) and covered by varnish resistant to heat (up to 800 °C) and abrasion.

Research of dynamic parameters of gas flow was performed in different multi-channel cyclone channels at different average velocities – 8 m/s, 12 m/s and 16 m/s. Three different types of pressure tests were carried out during the research of aerodynamic parameters – dynamic, static and pressure drop in the cyclone system, – thus investigating the aerodynamic resistance.

Lignin, wood and wood ash FDPM were used for research of the removal efficiency of FDPM from gas flow using the newly designed multi-channel cyclone. A cascade impactor was used in the research on the removal efficiency of particular fractions of FDPM.

Numerical modelling was performed to determine the dynamic parameters of the gas flow and the impact of aggressive gas flow on the performance of the newly designed multi-channel cyclone and to select optimal parameters, thereby avoiding additional costs for the production, adjustment and improvement of the experimental bench. The parameters of the numeric multi-channel cyclone were used as a reference for the parameters of the newly designed multi-channel cyclone experimental stand (Fig. S2.2). The research and analysis of the two-phase (gas (air), particles injection) flow in the cyclone model was performed using the ANSYS software package Fluent.

The three resolution meshes of the multi-channel cyclone model were made using the *ANSYS CFD Fluent* software to achieve the reliability and accuracy of numerical modelling results.

Low detailed calculation mesh consists of 7 760 255, medium – 8 880 597 (Figure S2.2), high – 9 917 267 elements.

3. The results and analysis of theoretical and experimental research of aggressive gas flow dynamic parameters and removal efficiency of fine-dispersed particulate matter in newly designed multi-channel cyclone

Theoretical aggressive gas flow studies were conducted at various temperature and humidity conditions. Empirical expressions were selected to achieve the highest accuracy results.

According to the obtained theoretical results, a specially adapted mathematical expression (S3.1) has been created to determine the relation of gas flow velocity to the relative humidity of the aggressive gas flow.

$$U_1 = x_2 \cdot \varphi + y_2, \quad (\text{S3.1})$$

if $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = -0.0008$, $y_2 = 12.04$; if $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = 0.0046$, $y_2 = 12.6467$; if $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = 0.0296$, $y_2 = 13.446$; if $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $x_2 = -0.5482$, $y_2 = 15.3022$;

here: U_1 – aggressive gas flow velocity in the cyclone, m/s; φ – relative humidity of aggressive gas flow, %; this expression can be used when the aggressive gas flow temperature $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the relative humidity $\varphi = 0\text{--}95\%$, x_2 – the first variable of velocity, m/(s·%); y_2 – the second variable of velocity, m/s.

The adhesion (coating) phenomenon on the surfaces was determined experimentally using lignin, wood and wood ash FDPM in 150 thousand m^3 of aggressive gas, i.e. approximately 150 cyclone working hours at $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ and relative humidity $\geq 95\%$. The average concentration of FDPM was up to 5 g/m^3 .

The internal elements of the newly designed multi-channel cyclone are made of stainless steel of high smoothness. This reduces the adhesion, thus avoiding the blockage of cyclone elements with FDPM.

Evaluation of the smoothness of the stainless steel surface showed that the maximum height of protrusion and recess is approximately equal, and their values at the untreated surface were $0.9\text{--}1.1\text{ }\mu\text{m}$, i.e. less than the surface profile of sandblast grinded galvanized sheet. The surface of stainless steel of sandblast grinded sheet increases the surface smoothness slightly – by about 14%; the profile is shown in Figure S3.1.



Fig. S3.1. Surface profile of sandblast grinded stainless steel (source: author)

Such surface treatment significantly reduces the size of protrusion and recess, which improves the surface properties and prevents particle adhesion. The average arithmetic deviation of the profile of varnished stainless steel is $0.089\ \mu\text{m}$.

Adhesion phenomena were investigated in a multi-channel cyclone with one inlet and in the newly designed multi-channel cyclone. After the experiment, common trends in particle adhesion were identified. As expected, an FDPM layer of up to 1–2 cm thickness was observed on all four walls of the quarter-ring-formed elements of the channels of the multi-channel cyclone.

It has been observed that the adhesion of lignin FDPM is most pronounced on the separation chamber wall at the second inlet (secondary flow), the thickness of particle layer is 1 to 2 mm and an area of about $50\times 50\ \text{mm}$ is covered.

Research of aerodynamic parameters has determined the distribution of gas flow velocity and pressure in the newly designed multi-channel cyclone stand. The velocities at individual channel points varied from 6.9 to 17.4 m/s, the average velocity in cyclone channels was 12 m/s (Figure S3.2) when the total flow in all inlets was $1290\ \text{m}^3/\text{h}$.

The maximum velocity was observed at the end of the first channel (Figure S3.2, point 1.3), while the lowest gas velocity was at the beginning of the fourth channel. This can be explained by the fact that the cross-sectional area of the cyclone channels is slightly smaller towards their end point.

When the average velocity of gas flow was 16 m/s, the change of gas flow velocity in the channels stood at 2.32 times, at 12 m/s – 2.52 times, at 8 m/s – 2.13 times. It can be assumed that the gas velocity may be insufficient for aggressive gas flow movement at the velocity of 8 m/s, especially at measuring points no. 2.1, 3.1 and 4.1. As a result, FDPM accumulation will start to form and cause adhesion and cohesion of particles, which will subsequently result in cyclone clogging. In order to avoid adhesion, it has been decided to carry out further research with an optimal gas velocity of 12 m/s.

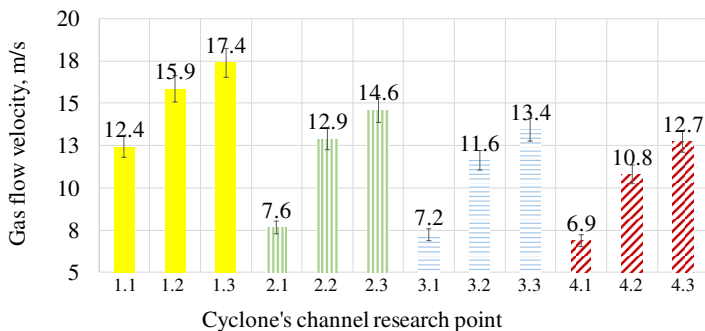


Fig. S3.2. Gas flow velocity distribution in the channels of the newly designed multi-channel cyclone at the average velocity of 12 m/s (source: author)

An aerodynamic resistance of the newly designed multi-channel cyclone was by 18.2% higher than that of the multi-channel cyclone with one inlet at gas velocity of 12 m/s and less. The aerodynamic resistance was equal to 335 Pa, 225 Pa and 110 Pa at the aggressive gas flow velocity of 16 m/s, 12 m/s and 8 m/s respectively. In these cases,

the trend of static pressure in front and behind the cyclone and dynamic pressures remained similar, i.e. 538 Pa and 428 Pa respectively.

The removal efficiency of lignin FDPM was the highest in all cases; the efficiency reached its maximum point at an average velocity of 12 m/s and stood at 88.2% (Fig. S3.3).

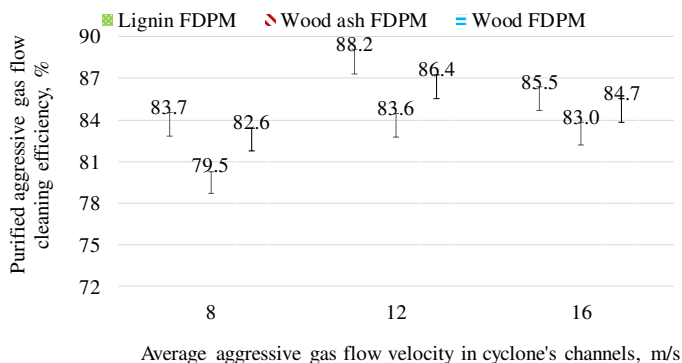


Fig. S3.3. The dependency of the efficiency of cleaning of aggressive gas flow from lignin, wood ash and wood fine-dispersed particulate matter in the newly designed multi-channel cyclone on the cleaned gas flow and cyclone operation time at different average flow velocity in the channels (source: author)

The removal efficiency of wood ash and wood FDPM was respectively by 4.6% and 1.8% lower. The removal efficiency of all types of FDPM was lower by about 4.1% at the lower aggressive gas flow velocity (of 8 m/s) compared to that of 12 m/s. No significant accumulation of FDPM was observed at 150 000 m³ of aggressive gas flow during approximately 116 hours of operation.

The removal efficiency of lignin FDPM of 10 µm stood at 81.3%, that of 2.5 µm and 1 µm – 50.5% and 28.0%, respectively (Fig. S3.4). The average removal efficiency of wood FDPM was by 1.7% lower than that of lignin FDPM. The removal efficiency of wood ash FDPM was higher by 1.7% at 800 mg/Nm³ and lower by 0.4% at 300 mg/Nm³ compared to wood FDPM. The removal efficiency from gas flow decreased on average 1.05 times when the total concentration of lignin FDPM was 500 mg/Nm³. The removal efficiency of the largest of the analysed FDPM – 10 µm – stood at 79.1%.

The medium detailed calculation mesh of the newly designed multi-channel cyclone has been chosen as it has been identified as the most suitable based on the research conducted with the multi-channel cyclone geometry. The numerical modelling has been used to analyse the velocity distribution of gas flow and its variation at the beginning of each channel. It was found out that the maximum gas flow velocity is reached at the inner surface of a quarter-ring-formed element, immediately behind the border layer.

$k-\omega$ SST viscosity model has been identified as optimal to model CFD processes (Fig. S3.5) in the newly designed multi-channel cyclone.

The area of this zone is the largest in the first channel (Fig. S3.5a, No. 4), where the range of values was 15.4–19.5 m/s.

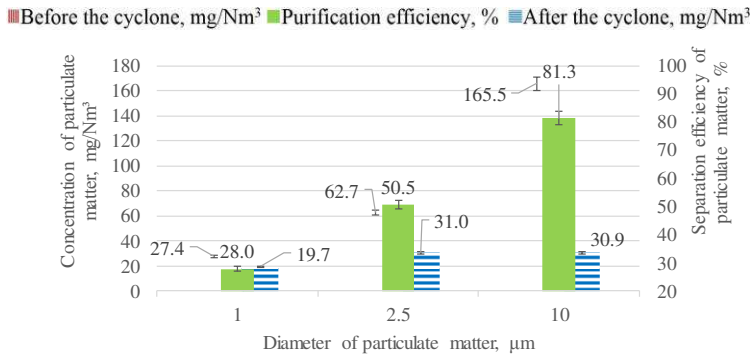


Fig. S3.4. The removal efficiency of the newly designed multi-channel cyclone of different sizes of lignin fine-dispersed particulate matter from the aggressive gas flow and their distribution in cyclone's inlet and outlet, at $800 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ total concentration and at the average velocity of 12 m/s in the cyclone's channels (source: author)

The gas flow path is directed to the conical hopper of the cyclone, and the gas flow velocity decreases twice – to $3.1\text{--}5.1 \text{ m/s}$ in the inlet to the upper part of the hopper. This gas flow path is favourable for the precipitation of FDPM.

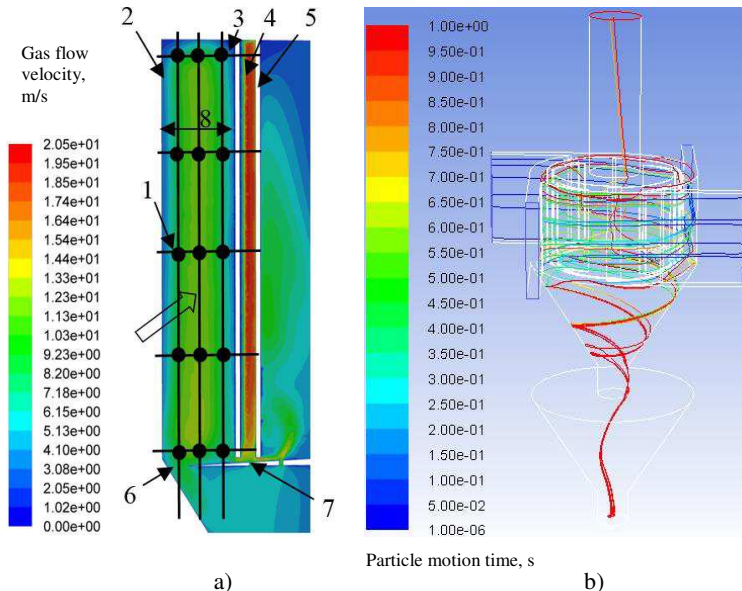


Fig. S3.5. The numerical model of aggressive gas flow in the newly designed cyclone made using modified $k\text{--}\omega$ SST viscosity model: a) distribution of gas flow velocities in the 1st channel; b) the motion trajectories and time of the particulate matter of $10 \mu\text{m}$ in diameter; 1 – gas flow velocity point in the grid; 2, 3, 4 – border layer at the peripheral wall, at the outer and inner surfaces of a curved element; 5 – adjacent curved element; 6, 7 – external continuous ring gap and segmental ringed overlaid slits of the channel (source: author)

The particles are captured at high velocity, directed through the slots, and are not redirected back into the separation chamber due to the low average velocity inside the hopper.

The residuals of velocity (u , v , w) and turbulent kinetic energy variables are equal to 10^{-4} and the energy variable residual is equal to 10^{-7} applying the first and second order discretization equations and the optimal relaxation coefficients. The relative error of the results of the last external channel (the fourth channel) was the lowest, and the average error for gas flow velocity in all three channels was 8.6%. It can be stated that the smallest errors were obtained by comparing the experimental results in the first channel. The average relative error was 6.3%.

The removal efficiency in the newly designed multi-channel cyclone depends on the aggressive gas movement and FDPM motion processes. For this purpose, the trajectories of the FDPM movement from the inlet to the hopper or to the outlet (Fig. S3.5b) were analysed. The colour of the pathline defines the time when the particle reached the point of interest.

The results of FDPM motion research showed that the average removal efficiency of a 10 μm diameter particle was 1.7 times higher (i.e. stood at 71.9%) compared to FDPM of 2.5 μm (41.3%).

The results of experimental and modelling studies showed that the relative errors of capture efficiency can be regarded as relatively less significant as the particle diameter was bigger. The average error of all cases studied was 11.8%.

The highest removal efficiency stood at 88.2% for lignin FDPM. The removal efficiency of wood and wood ash was 86.4% and 83.6% respectively. The removal efficiency of PM of 10 μm was 80%, 2.5 μm – 49.7%, and 1 μm – 27.6% when the overall FDPM concentration was 800 mg/Nm^3 .

General conclusions

1. There are ample studies reported in scientific literature where the improved design of cyclones and multi-channel cyclones has been analysed, the removal efficiency of fine-dispersed particulate matter from a non-aggressive gas flow has been investigated. However, the research of a worldwide technology for removal of fine-dispersed particulate matter from aggressive gas has been limited to solving demisting problems of treatment plant, improving cyclone designs for removal particulate matter from the combined type gas-liquid phase, increasing overall removal efficiency. In addition, to date there have been no technological solutions implemented to prevent adhesion of particulate matter in the multi-channel cyclones.

2. The research methods selected were used for removal particulate matter from aggressive gas flow of 145 °C temperature and above 95% relative humidity. In addition, the structural and aerodynamic parameters of the developed experimental stand of the newly designed multi-channel cyclone were selected. Lignin, wood and wood ash fine-dispersed particulate matter of 2.5 μm , 10 μm and total fraction of 600–1000 kg/m^3 total density were investigated and the method of ensuring the removal efficiency of FDPM using the weight method were investigated. The mathematical dependences of relative

humidity and gas flow rate on aggressive gas flow parameters, and the impact of carbon monoxide and acetone on the removal process of particulate matter were evaluated from a theoretical perspective. The removal of particulate matter and gas flow movement processes were analysed using the numerical models of the object and the optimal was selected, a graphical representation was obtained.

3. Compared to normal conditions (assuming that temperature is 0 °C and the relative humidity is 50%), the value of density of the wet gas flow decreases from 1.295 kg/m³ to 1.280 kg/m³, the value of dynamic viscosity increases from 17.17 μPa·s to 24.99 μPa·s and the value of kinematic viscosity increases from 13.25 mm²/s to 19.52 mm²/s.

4. Multi-channel cyclones are unsuitable for operation with aggressive gas flow (when temperature is from 50 °C to 200 °C, humidity is more than 95%, and there are chemical compounds in the gas flow) as they blocked during the cleaning process. The internal elements get covered with an FDPM layer of 5–20 mm, reducing the highest removal efficiency from 90.5% to 77.6% after 150 000 m³ of aggressive gas, while aerodynamic resistance increases to 15%.

5. An adhesion of FDPM can be reduced by up to 90% (from 4 cm particle thickness to 0.5 cm) by sanding of metal surface as a long-term method to increase the smoothness of multi-channel cyclone internals, thus the average value of profile height value of 0.45 μm. A short-term treatment includes varnishing where adhesion is relatively avoided and the average value of profile height up to 0.16 μm is determined. Grinding of metal surface can be performed in order to reduce the average arithmetic deviation of the surface profile from 1.2 to 2 times; in comparison, lacquering of surface reduces the said parameter from 2.4 to 9 times. Hence, using sanding and varnishing on the untreated stainless steel surfaces increases the surface smoothness from 1.2 to 3 times, respectively.

6. The highest removal efficiency stood at 88.2% recorded for removal of fine-dispersed lignin particulate matter of less than 20 μm in diameter at an average flow velocity of 12 m/s in the cyclone channel, having treated 150 000 m³ of aggressive gas. The static pressures at the front of and behind the newly designed multi-channel cyclone were 735 Pa and 510 Pa respectively, the aerodynamic resistance was 225 Pa at an average gas flow velocity of 12 m/s.

7. The studies have shown that the average removal efficiency of FDPM from aggressive gas stood at 86%. Although, the removal efficiency of the newly designed multi-channel cyclone is by 2–4% lower than that of a multi-channel cyclone; however, the newly designed industrial pilot multi-channel cyclone can be used for removal of fine-dispersed particulate matter from the aggressive gas flow of up to 150 000 m³ in the absence of significant clogging of the cleaning equipment.

8. The experimental studies of the removal efficiency of particulate matter have shown that removal efficiency also increases as the total concentration of particulate matter increases. The removal efficiency of PM_{2.5} at 800 mg/Nm³ and higher concentration increases noticeably from 43.5 to 50.5%. The increase trend of removal efficiency for other PM fractions also remains.

9. Numerical modelling research was carried out to investigate k - ϵ and k - ω viscosity models and their modifications using calculation meshes of a different level of detail designed using the ANSYS software package Fluent subprogram. It has been determined, that the smallest residuals of model variables are obtained by using modifications of k - ϵ

and $k-\omega$ viscosity models. In order to achieve an accuracy of the solution, the model of numerical object made of $9.92 \cdot 10^6$ cells, the boundary layer was expanded to 8 levels, and the optimal model parameters were found. The reliability of the test results differ on average by 12.8%, a discrepancy of less than 15%, compared to experimental studies of the newly designed multi-channel cyclone channels.

10. It has been found that the value of the removal efficiency of FDPM differ from experimental studies as less as the particle diameter is larger. The removal efficiency of particles of 2.5 μm and 10 μm in diameter stood at 71.9% and 41.3%, respectively, thus the particles of 70 μm in diameter full-captured. An incomplete correspondence of the real object, the two-phase motion trajectories and their properties may be the reason for the slight difference between the obtained experimental and modelling results, the average error is less than 15% and stood at 11.8%.

11. Theoretical, experimental and numerical modelling research of the newly designed multi-channel cyclone has shown that the obtained results are representative and reliable: the average aggressive gas flow velocity at the beginning of the first channel is 11.9 m/s; the overall removal efficiency is up to 84.5%. The differences between the obtained values were up to 10%.

11. Taking into account the results of theoretical and experimental research and numerical modelling, it has been determined that the applied design solutions, proper element processing and selected optimal aerodynamic parameters for the operation of the purification system, the objective is effectively achieved for removal of fine-dispersed particulate matter from aggressive gas.

Recommendation

An industrial pilot multi-channel cyclone has been developed for removal of fine-dispersed particulate matter from an aggressive gas flow. The emissions of lignin, wood and wood ash particulate matter occur during biofuel combustion, various mechanical treatment or drying processes. The customized elements of the final design were as follows: the quarter-ring-formed elements, the opening slots with a plate folded at a 5° angle in the quarter-ring-formed elements, an optimum outer ringed continuous slit of 0.03 m in width and the segmental ringed overlaid slits of 0.005 m in width. It is proposed to produce the internal elements of the newly designed multi-channel cyclone from stainless steel to increase the smoothness of the internal design; the arithmetic deviation of such surface profile is 0.273 μm . It is suggested that the peripheral and transit flow distribution would be established to meet the 50 / 50 ratio by adjusting the position of the curved elements. This arrangement resulted in the highest up to 88.2 % removal efficiency of fine-dispersed particulate matter. At the optimum average aggressive gas flow velocity of 12 m/s in the cyclone's channels, the flow rate reaches up to 1300 m^3/h , and the aerodynamic resistance of the cyclone is 225 Pa.

Priedai³

- A priedas.** Statistinio duomenų apdorojimo metodika
- B priedas.** Cinkuotos skardos ir juodojo metalo paviršiaus glotnumo tyrimų rezultatų analizė
- C priedas.** Medienos ir medienos pelenų 2,5 μm ir 10 μm kietųjų dalelių šalinimo efektyvumo tyrimų rezultatų analizė
- D priedas.** Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija
- E priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- F priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Aleksandras CHLEBNIKOVAS

SMULKIADISPERSĖMS KIETOSIOMS DALELĖMS
IŠ AGRESYVIŲ DUJŲ ŠALINTI PATOBULINTO
DAUGIAKANALIO CIKLONO TYRIMAI IR KŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
aplinkos inžinerija (T 004)

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE MULTI-CHANNEL
CYCLONE FOR REMOVAL OF FINE-DISPERSED
PARTICULATE MATTER FROM AGGRESSIVE GAS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (T 004)

2019-09-03. 18,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
Mickevičiaus g. 5, LT-08119 Vilnius